

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

**VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

***"ІННОВАЦІЙНІ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ"***



**ОДЕСА
2017**

Публікуються доповіді, представлені на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (4 – 8 вересня 2017 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

доктор техн. наук, професор

О.Г. Бурдо

Ю.О. Левтринська

Е.Ю. Ананійчук

О.В. Катасонов

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров <i>Богдан Вікторович</i>	- голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо <i>Олег Григорович</i>	- вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк <i>Володимир Михайлович</i>	- Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв <i>Леонард Леонідович</i>	- Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
Гавва <i>Олександр Миколайович</i>	- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький <i>Ярослав Михайлович</i>	- Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський <i>Анатолій Андрійович</i>	- Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАНУ
Зав’ялов <i>Владимир Леонідович</i>	- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Керш <i>Владимир Яковлевич</i>	- Одеська державна академія будівництва та архітектури, д.т.н., професор
Колтун <i>Павло Семенович</i>	- Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
Корнієнко <i>Ярослав Микитович</i>	- Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик <i>Іван Федорович</i>	- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов <i>Валерій Михайлович</i>	- Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
Паламарчук <i>Ігор Павлович</i>	- Вінницький національний аграрний університет, д.т.н., професор
Снежкін <i>Юрій Федорович</i>	- Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., член-кор. НАНУ
Сорока <i>Петро Гнатович</i>	- Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Тасімов <i>Юрій Миколайович</i>	- Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський <i>Леонід Леонідович</i>	- Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Ткаченко <i>Станіслав Йосифович</i>	- Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
Ульєв <i>Леонід Михайлович</i>	- Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Черевко <i>Олександр Іванович</i>	- Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
Шит <i>Михайл Львович</i>	- Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.

УДК 66.069.84; 66.084; 628.316; 628.32

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ КОНДЕНСАТУ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З ЗАСТОСУВАННЯМ СПОСОБУ ДИСКРЕТНО- ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Долінський А.А. доктор техн. наук, Целень Б.Я. канд. техн. наук,
Іваницький Г.К. доктор техн. наук, Коник А.В. канд. техн. наук,
Радченко Н.Л. канд. техн. наук, Гартвіг А.П.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

NEUTRALIZATION OF THE CONDENSATE OF NATURAL GAS CONTAINMENT WITH THE USE OF DISCRETE-PULSE INTEGRATION OF ENERGY

Dolinskiy A.A. Doctor of Technical Sciences, Tselen B.Ya. Ph.D.,
Ivanitskiy G.K. Doctor of Technical Sciences, Konyk A.V. Ph.D.,
Radchenko N.L. Ph.D., Hartviih A.P.
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of
Ukraine

Анотація: В даній роботі запропоновано новий спосіб нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу без використання хімічних реагентів з метою його повторного використання для промислових потреб, а також як води для живлення водогрійних котлів промислових і комунальних котельних. Висунуто гіпотезу, що конденсат димових газів за своїм складом є знесоленою водою, що наближається до дистильованої води з присутніми в ньому діоксидом вуглецю в розчиненому стані і у вигляді стабільних нанорозмірних бульбашок (bubstones), вугільної кислоти і газової фази у вигляді мікробульбашок, що містять суміш діоксиду вуглецю з азотом. Новизною даної роботи є виконане аналітичне дослідження процесу десорбції діоксиду вуглецю з конденсату способом дискретно-імпульсного введення енергії, розроблена робоча конструкторська документація на виготовлення дослідного зразка установки, виготовлений дослідний зразок установки для нейтралізації конденсату продуктів згоряння газу без використання реагентів. Створений дослідний зразок установки дозволить зменшити витрати на підготовку води для живлення котлів за рахунок використання нейтралізованого конденсату і скоротити кількість стічних вод. Використання дослідного зразка установки нейтралізації конденсату дозволить поліпшити стан довкілля шляхом зменшення кількості стоків (хімічно забрудненого нейтралізованого конденсату і відходів установок пом'якшення води), раціонально використовувати водні ресурси за рахунок зниження потреби у природній воді (у випадку повторного використання нейтралізованого конденсату).

Abstract: A new method of neutralizing the condensate of the combustion products of natural gas without using of chemicals with a view for its reuse for industrial purposes, as well as the water to power industrial boilers and utility boilers is proposed. A hypothesis that acidic condensate of flue gases is a demineralized water and similar to distilled water which consists carbon dioxide in dissolved form and in the form of stable nanosized bubbles (bubstones), carbonic acid and a gas phase in the form of microbubbles containing a mixture of carbon dioxide with nitrogen is proposed. Thus between carbon dioxide in the bubbles and carbon dioxide in solution there is equilibrium. The proposed method of neutralizing the acidic condensate is based on the mechanisms of discrete-pulse input of energy of initiated by the rotary-pulsating apparatus of special design with partial use of thermovacuum technology. The novelty of the scientific and technical work is: analytical study of the process of desorption of carbon dioxide from acidic condensate by the method of discrete-pulse input of energy is carried out; developed a working design documentation for production of a prototype apparatus; made a prototype apparatus to neutralize the acidic condensate of gas combustion products without the use of chemicals. Developed a prototype apparatus will reduce the cost of water treatment for power boilers by using neutralized condensate and reduce the amount of wastewater. Experimental study of changes in the pH value of condensate is performed on the prototype device. It is established that the increase in pH took place within 2 minutes of treatment. The maximum pH reached 6.2 while maintaining the samples between 3 and 24 hours. The potential productivity of existing prototype apparatus is about 450 l/h of neutralized condensate. Using installations for neutralization of acidic condensate will allow to improve the environment by reducing the amount of waste (chemically contaminated condensate after

neutralization and waste water from installations a water softening) and rational use of natural water by reducing the amount of its use (in the case of re-use of acidic condensate).

Ключові слова: конденсат димових газів, нейтралізація, вугільна кислота, діоксид вуглецю.

Keywords: the condensate of flue gases, neutralization, carbonic acid, carbon dioxide.

Протягом тривалого часу економайзери для котлів проектували для охолодження димових газів до температури $140\div 150^{\circ}\text{C}$, що було зумовлено техніко-економічною недоцільністю більш глибокого їх охолодження через низьке співвідношення цін на паливо і метал та можливістю корозії теплообмінних поверхонь при контакті з конденсатом при охолодженні димових газів до температури нижче точки роси.

На сьогоднішній день внаслідок суттєвого зростання цін на паливо і теплову енергію стало доцільним глибоке охолодження продуктів згоряння природного газу. При цьому за рахунок отримання додаткової кількості теплоти (фізичної теплоти димових газів і теплоти конденсації водяної пари, що входить у склад димових газів) коефіцієнт корисної дії котлоагрегату можна підвищити на $8\div 12\%$ [1]. Однак, конденсат, що утворюється при охолодженні димових газів нижче точки роси, не знаходить подальшого застосування через кислотні властивості і, після хімічної нейтралізації, надходить в стічні води підприємства.

З огляду на те, що з 1 МВт теплової потужності котлоагрегату може утворюватися до 140 л/год конденсату доцільно розглянути можливість його повторного використання, що дозволить зменшити споживання природної води і викиди стічних вод.

Утворений конденсат за своїм фізико-хімічним складом, в основному, є розчином вугільної кислоти, що зумовлює низьке значення величини водневого показника (рН), що знаходиться в межах $3,8\div 4,9$. Вилучення з конденсату вугільної кислоти, уникаючи способу хімічної нейтралізації, дозволить отримувати воду, близьку до дистильованої. Така вода може бути використана для приготування води для живлення котлів, минаючи стадію пом'якшення води, а також для інших технологічних потреб.

В Інституті технічної теплофізики НАН України запропоновано спосіб безреагентної нейтралізації кислого конденсату [2], що ґрунтується на механізмах дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) ініційованих на базі роторно-пульсацийного апарата (РПА) спеціальної конструкції з частковим використанням термовакуумної технології.

Враховуючи те, що кислий конденсат містить до 70 мг/л діоксиду вуглецю в той час як його розчинність у воді становить 0,47 мг/л (при 20°C і 0,1 МПа) нами висунуто гіпотезу про те, що діоксид вуглецю в конденсаті існує як у розчиненому стані так і у вигляді окремих або згрупованих у кластери бульбашок мікро- і наномасштабних розмірів (так званих *bubstones* [3, 4] розміром до 0,1 мкм і газових бульбашок розміром $0,1\div 10$ мкм [5]) причому між діоксидом вуглецю в бульбашках і діоксидом вуглецю в розчині існує певна рівновага. При цьому приблизно 1% розчиненого діоксиду вуглецю вступає в хімічну реакцію з водою утворюючи вугільну кислоту близько 5% якої дисоціює у воді на іони водню, гідрокарбонат-іони і карбонат-іони. Таким чином, в розчині встановлюється рівновага між діоксидом вуглецю в газовій фазі бульбашок, розчиненим діоксидом вуглецю в рідині, вугільною кислотою, гідрокарбонат-іонами і карбонат-іонами. Іони водню, що утворюються при цьому призводять до зниження рН розчину.

Нейтралізація конденсату запропонованим нами способом досягається за рахунок вилучення стабільно існуючих при нормальних умовах бульбашок діоксиду вуглецю внаслідок збільшення їх розмірів з можливістю реалізації явища інверсії структури потоку, тобто перетворення потоку з бульбашко-рідинної структури в крапельно-газову. При цьому на обробку надходить рідина, насичена мікроскопічними бульбашками діоксиду вуглецю під час якої утворюється суміш водяної пари з діоксидом вуглецю, в якій знаходиться велика кількість полідисперсних краплин рідини. Газова фаза при цьому відводиться з апарата. Одночасно при цьому відбувається розпад вугільної кислоти внаслідок порушення вуглекислотної рівноваги і вилучення інших газів з конденсату. Критичне значення газовмісту, при перевищенні якого відбувається безповоротна коагуляція бульбашок і наступна інверсія фаз становить 0,65 [6–7].

На базі створених в ІТТФ НАН України універсальних математичних моделях динаміки одиничних газопарових бульбашок і динаміки ансамблю бульбашок, які детально наведені в роботах [8, 9] проведено чисельне моделювання процесу зростання газопарових бульбашок в конденсаті. В рамках математичної моделі динаміки ансамблю бульбашок було проведено аналітичне дослідження еволюції сукупності парогазових бульбашок до моменту досягнення критичної величини газовмісту.

На рис. 1 показано зміну величини газовмісту в залежності від радіусу зростаючих бульбашок в монодисперсному ансамблі. Розглянуто монодисперсні сукупності бульбашок з сімома значеннями початкових радіусів в інтервалі від 0,7 мкм до 10 мкм при початковій концентрації діоксиду вуглецю 70 мг/л і температурі рідини 25°C. Пунктирною лінією показано значення критичного газовмісту (відношення об'єму газової фази до об'єму рідини) $\beta_{inv} = 0,65$ при якому відбувається інверсія структури потоку (перехід від рідинно-бульбашкової структури до газо-крапельної). З рисунка видно, що для всіх значень початкових радіусів радіуси бульбашок при досягненні критичного газовмісту збільшуються приблизно в п'ять разів, тобто об'єм бульбашкової фази зростає більш ніж на два порядки. Ті ділянки кривих 1–7, що знаходяться вище пунктирної лінії не відповідають реальному стану, бо в цій області бульбашок вже не існує внаслідок інверсії фаз.

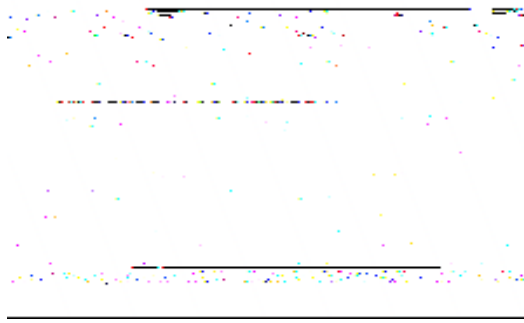


Рис. 1. Залежність величини газовмісту монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді від їх поточного радіусу при різних значеннях початкових радіусів: 1 – 0,7 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм; 5 – 4 мкм; 6 – 5,0 мкм; 7 – 10,0 мкм.

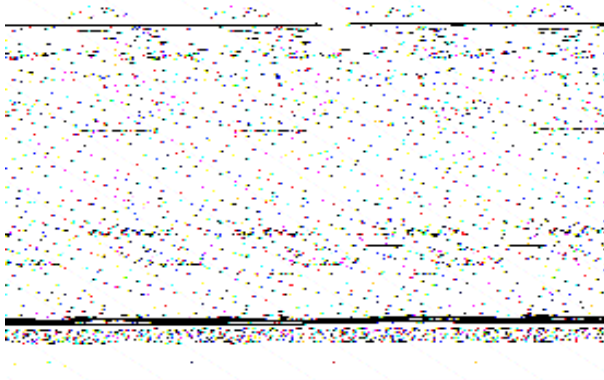


Рис. 2. Зміна з часом радіусу величини газовмісту монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді при різних значеннях початкових радіусів.

так і по величині, короточасні мікрОВихори тощо. Внаслідок сукупної дії цих факторів – високочастотних гальмувань і прискорень рідини, вихроутворення, інтенсивного перемішування тощо можливе зіткнення бульбашок, їх коагуляція і формування бульбашок більш великих розмірів або бульбашкових асоціацій [6, 10]. Тоді великі бульбашки формуються вже під час проходження конденсату через канали РПА.

Проведені розрахунки також показали, що швидкість десорбції діоксиду вуглецю з поверхні краплин конденсату за час перебування їх на стадії вилучення газу дуже мала у порівнянні зі швидкістю виділення з конденсату нерозчиненої вільної вуглекислоти. Саме в цьому полягає перевага і перспективність запропонованого методу нейтралізації.

Для підтвердження отриманих результатів чисельного моделювання процесу вилучення з рідини вуглекислоти проведені експериментальні дослідження зміни величини рН конденсату продуктів згоряння природного газу на виготовленому дослідному зразку установки принцип роботи якого базується на запропонованому способі нейтралізації.

На рис. 2 наведені результати розрахунку залежності величини газовмісту від часу зростання бульбашок для дев'яти монодисперсних бульбашкових ансамблів з початковими радіусами в інтервалі від 0,5 мкм до 5 мкм при початковій концентрації діоксиду вуглецю 70 мг/л і температурі рідини 25°C. Як видно з рисунку, бульбашки малого розміру з початковим радіусом до 0,6 мкм загалом не зростають при даному режимі роботи установки. Характерним є те, що бульбашки всіх початкових розмірів від 0,7 до 5 мкм досягають критичного значення газовмісту практично за однаковий проміжок часу (115–140 мкс) з моменту спадання зовнішнього тиску. Характерним також є те, що наростання газовмісту в сукупності бульбашок з відносно великими бульбашками з початковим радіусом понад 2 мкм відбувається повільно, тоді як для сукупності малих бульбашок з початковим радіусом до 1 мкм газовміст зростає майже миттєво. Наведені результати дають певну корисну інформацію для проведення подальших досліджень по цій проблемі.

Як показали наведені вище результати дослідження, бульбашки малого розміру з початковим радіусом до 0,6 мкм загалом не можуть зростати навіть при великих перепадах тисків, що ініціюються при обробці конденсату запропонованим способом. Також даний спосіб обробки не може призводити до подальшого подрібнення мікробульбашок. Однак при проходженні рідинно-бульбашкового потоку через канали РПА всередині апарата ініціюється низка потужних механізмів, внаслідок яких відбувається сильна динамічна дія на потік рідини: дуже високі напруження і швидкості зсуву (порядку $2,5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$), періодичні високочастотні зміни тиску та аномально високі зміни прискорень як по напрямку

Обробку конденсату здійснювали наступним чином. Конденсат об'ємом 33 л оброблювали в замкнутому контурі дослідного зразка установки в режимі рециркуляції протягом 16 хвилин при відсутності подачі і видачі обробленої рідини з установки. Проби конденсату відбирали через кожні 2 хвилини протягом обробки з метою визначення оптимального часу його обробки на основі отриманих результатів величини рН. Відібрані проби конденсату зберігали протягом двох діб в негерметично закритих поліпропіленових одноразових стаканах без доступу прямого сонячного світла. Вимірювання величини рН проводили багатофункціональним приладом COnDO EZODO PCT-407 для аналізу параметрів води одразу після відбору проби, через 3 години, 1 добу і 2 доби після обробки.

На рис. 3 наведено зміну величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки в контурі дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного.

Отримані результати показують, що основна зміна величини рН відбувається протягом перших 2 хвилин обробки. Подальша обробка рідини також призводить до підвищення величини рН, проте швидкість його зростання значно нижча, хоча й стабільна протягом всього часу обробки. Це дозволяє припустити, що протягом перших двох хвилин обробки відбувається вилучення основної кількості вуглекислоти, розчиненої в конденсаті.

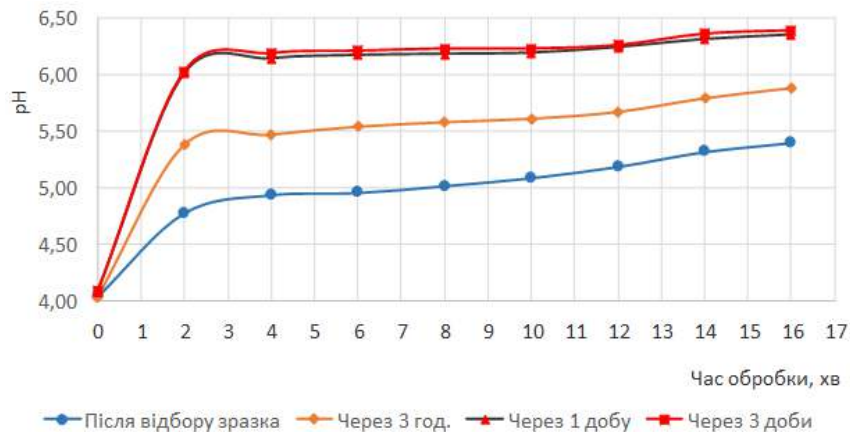


Рис.3. Зміна величини рН конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки.

Також видно, що оброблена рідина перебуває в нестабільному стані, про що свідчить подальше зростання величини рН рідини протягом подальшого зберігання проб. Після витримки обробленого конденсату отримали значення величини рН вище 6,0 при тривалості обробки 2 хвилини. Аналізуючи закономірність зростання величини рН на цій діаграмі з високою достовірністю можна припустити, що отримати величину рН конденсату вище 6,0 можна протягом меншої тривалості обробки, що дозволить підвищити продуктивність обладнання (потенційна продуктивність дослідного зразка існуючої установки становить близько 450 л/год обробленого конденсату), проте для підтвердження цієї гіпотези слід провести повторний експеримент з меншим інтервалом відбору проб конденсату під час обробки.

Зміна температури конденсату під час його обробки внаслідок дисипативного виділення теплоти становила приблизно 1,8°C/хв і для робочого циклу 1,5÷2 хв несуттєва. Однак, підвищення температури повинно позитивно впливати на швидкість вилучення діоксиду вуглецю з рідини, тому конденсат на обробку бажано подавати одразу після економайзера системи глибокої утилізації теплоти димових газів котлоагрегату.



Продуктивність, т/годину – до 0,6
Споживання електроенергії, кВт · год – 3,75
Габарити, мм – 750x880x1420



Продуктивність, т/годину – до 1,2
Споживання електроенергії, кВт · год – 3,75
Габарити, мм – 750x800x1100

Рис. 4. Установка для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу і технічні характеристики її модифікацій.

На сьогоднішній день в рамках досліджень в цьому напрямку розроблено і виготовлено дві модифікації дослідного зразка установки нейтралізації (рис. 4), що відрізняються продуктивністю нейтралізації і можуть знайти застосування при роботі з газовими водогрійними і паровими котлами сумарною тепловою потужністю до 5 або 10 МВт [5]. Дані установки характеризуються низьким питомим споживанням енергії, а також низькими габаритами, металоємністю і можуть працювати як в режимі ручного керування так і автоматичному режимі.

Висновки.

Створений дослідний зразок установки дозволить зменшити витрати на підготовку води для живлення котлів за рахунок використання нейтралізованого конденсату і скоротити кількість стічних вод.

Основні техніко-економічні показники розробленого дослідного зразка установки: продуктивність – до 450 л/год; споживання електроенергії – 3,75 кВт·год; габаритні розміри – 650x800x1100 мм; величина водневого показника (pH) нейтралізованого конденсату – не нижче 6,0.

Запропонований спосіб обробки рідини базується на використанні низки фізичних явищ при ДІВЕ і при відповідному виборі параметрів обробки може знайти застосування не лише для нейтралізації кислого конденсату але й для обробки інших рідин з метою зміни їх фізико-хімічних параметрів (величини окисно-відновного потенціалу, електропровідності, вмісту розчинених газів тощо) у різних галузях промисловості.

Науково-технічна робота виконувалась в Інституті технічної теплофізики НАН України згідно договору №ДЗ/52-2015 з МОН України.

Література

1. Новгородский Е. Е., Бесчетный В. В. Проектирование энергосберегающих установок теплогенераторов при использовании рекуперативных конденсационных теплоутилизаторов: Методические указания к практическим занятиям по курсу «Энергосбережение». Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2010. 43 с.
2. Долінський А. А., Шурчкова Ю. О., Целень Б. Я. Безреагентна нейтралізація кислого конденсату продуктів згоряння природного газу та обладнання для її нейтралізації. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общей ред. А. А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. Киев: Академперіодика, 2015. 464 с.
3. Bunkin N. F., Bunkin F. V. Bubston Structure of Water and Aqueous Solutions of Electrolytes. Physics of Wave Phenomena. 2013. Vol. 21, No. 2. P. 81-109.
4. James R T Seddon, Detlef Lohse, William A Ducker, Vincent S J Craig. A deliberation on nanobubbles at surfaces and in bulk. Chemphyschem. 2012. 13(8). P. 2179-87.
5. Долінський А. А., Целень Б. Я., Гартвіг А. П., Коник А. В., Радченко Н. Л., Щепкін В. І. Утворення кислого конденсату при глибокій утилізації теплоти продуктів згоряння природного газу і обладнання для його нейтралізації. Наукові праці ОНАХТ. 2016. Т. 80, Вип. 1. С. 4–8.

6. Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., Mazheiko N. A., Surtaev A. S., Zhukov V. E. Peculiarities of superheated liquid discharging under strong and weak nonequilibrium conditions. J. Eng. Thermophys. 2010. Vol. 19, No. 4. P. 289–305.
7. Ишматов А. Н. Эволюция мелкодисперсных капель при взрывном распылении жидкости : автореф. дисс. на соиск уч. степ. канд. ф.-м. наук : спец. 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы". Бийск, 2011. 48 с.
8. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька. Пром. теплотехника. 1995. Т. 17, №5. С. 3–28.
9. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. II. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. Пром. теплотехника. 1996. Т. 18, №1. С. 3–20.
10. Стебновский С. В. Импульсное диспергирование как предельный режим разрушения жидкого объема. Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, №2. С. 117–128.

УДК 536.24:631.371

ЕКОНОМІЯ ВОДИ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Ткаченко С. Й. д-р техн. наук, професор,
Іщенко К. О. аспірант кафедри ТЕ
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

WATER SAVING IN INDUSTRIAL BIOGAS INSTALLATION PROCESSES

Tkachenko S. Y., Ishchenko K. O.
Vinnitsa national technical university, Vinnitsa

***Анотація.** Питання економії свіжої води та очищення забрудненої внаслідок технологічних процесів та побуту є актуальними на протязі останніх десятиріч. Для покращення екологічного стану повітря, ґрунтових вод і зменшення забруднення навколишнього середовища за кордоном активно розробляються і впроваджуються прогресивні технології, як для стічних вод, так і для полігонів твердих побутових відходів. Хоча в Україні працює більше 5000 очисних споруд, майже всі вони працюють за застарілими технологічними схемами без застосуванням сучасних технологій, таких як анаеробне перероблення з отриманням біогазу.*

Із збільшенням уваги до раціонального споживання свіжої води, як наслідок знижується її споживання, стічні води переробних та очисних підприємств стають більш концентрованими за умов зменшення їхньої загальної кількості. Для підприємств очищення стічних вод представляє серйозну проблему. Усе частіше перед підприємствами постають проблеми пошуку ефективних, надійних в експлуатації, гарантуючих стабільну і високу якість системи очищення стічних вод. Систему очищення характеризує ряд критеріїв: економічних, екологічних, енергетичних та соціальних. Економія свіжої води є проблемою, яка частково впливає на всі вищеописані критерії якості.

Проаналізована біогазова технологія з розділенням відпрацьованого субстрату на тверду і рідку фази. Запропоновано і досліджено метод часткового заміщення води рідкою фазою в процесі приготування субстрату. Складені балансові рівняння для технологічних процесів: підготовки субстрату з використанням гною і свіжої води; розділення відпрацьованого субстрату на тверду і рідку фази; підготовки субстрату з використанням гною, води та рідкої фази. Балансові рівняння застосовані для визначення раціональних умов використання рідкої фази в процесі підготовки субстрату для подачі в біореактор.

Запропоновано метод часткового заміщення води, з метою її економії, рідкою фазою відпрацьованого субстрату в процесі приготування свіжого субстрату для подачі в біореактор біогазової установки.

Для описаних технологічних процесів підготовки свіжого субстрату з використанням гною і свіжої води, а також з використанням гною, води та рідкої фази, розділення відпрацьованого субстрату на рідку і тверду фази, складені балансові рівняння, які дають змогу визначити умови ефективного застосування запропонованого методу.

Abstract. Question save fresh water and contaminated as a result of manufacturing processes and everyday life are relevant in the last decades. To improve of ecological air quality, and reduce groundwater pollution abroad actively developed and implemented advanced technologies for wastewater and for solid waste. Although Ukraine

has more than 5,000 sewage treatment plants, almost all of them work in obsolete technological schemes without the use of modern technologies such as anaerobic processing of biogas.

With increasing attention to the rational consumption of fresh water, as a result of reduced consumption, wastewater of clearing and processing enterprises become more concentrated in the conditions of reduction of their total number. For enterprises, sewage poses a serious problem. Increasingly, companies get up to the problem of finding effective, reliable operation, who guarantee a stable and high quality wastewater treatment system. Purification system characterized by a number of criteria: economic, environmental, energy and social. Saving fresh water is a problem that affects the part of all the above quality criteria.

Analyzed biogas technology division of spent substrate of the solid and liquid phases. The method of partial replacement of the water liquid phase in the preparation of the substrate. Compound balance equation for processes: preparing the substrate using of fresh manure and water; separation of the spent substrate of the solid and liquid phase; preparing the substrate using manure, water and liquid phase. Balance equation used to determine the conditions of rational use of liquid phase in preparation for feeding the substrate to the bioreactor.

The method of partial substitution of water for its economy, the liquid phase of spent substrate in the preparation of fresh substrate for supplying the bioreactor biogas plant.

For the preparation processes described substrate using fresh manure and fresh water, and using manure, water and liquid phase separation of the spent substrate in liquid and solid phases composed balance equations that allow to determine the conditions of effective application of the proposed method.

Ключові слова: стічні води, економія води, біогаз, тверді відходи, переробне підприємство

Keywords: wastewater, water saving, biogas, solid waste, processing enterprise

В Україні працює більше 5000 очисних споруд, які не приносять прибутку і створюють значне навантаження на місцеві бюджети [1]. Крім того, майже всі вони працюють за застарілими технологічними схемами без використання біогазових технологій, що дозволило б частково компенсувати витрати природного газу – біогазом. Останнім часом також загострилась ситуація з експлуатацією полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) в Україні [1, 2]. Головна проблема – це екологічний стан повітря, ґрунтових вод і забруднення навколишнього середовища.

Варіантом виходу з проблемної ситуації є реконструкція існуючих очисних споруд зі знищенням мулових полів і на їхньому місці добудову станцій сортування та утилізації несортованих твердих побутових відходів за технологією переробки органічної складової в комплексі з муловими складовими стічних вод шляхом метанування.

Дослідники [1], проводячи аналіз екологічної ситуації в Україні, виділили, що завдяки використанню сучасних світових технологій очистки стічних вод [Dunser.Aigner.Kollegen Ingenieurplanungsgruppe GmbH (Helmut Aigner)] стало можливим отримання води, яка буде відповідати стандартам для вод технічного використання і поливу. Впровадження біогазових технологій дасть можливість забезпечення енергетичної незалежності та екологічної безпеки очисних споруд будь-яких підприємств.

Метою даного дослідження є чисельний аналіз роботи системи економії води у системі біогазової установаки з метою підвищення її екологічної, економічної та енергетичної ефективності.

Біогазова установка (БГУ) призначена для безвідходної, екологічно чистої переробки, без специфічних запахів, органічних відходів усіх видів господарства (таких як гною на біогаз, а також у гігієнічно і хімічно чисті рідкі чи сухі добрива). В основу роботи БГУ закладені біологічні процеси зброджування і розкладання органічних речовин під впливом метаноутворюючих бактерій в анаеробних умовах, характерних відсутністю вільного кисню, високої вологості і температурного режиму зброджування.

Розглянуті у роботі [4] критерії якості комплексу з БГУ можна узагальнити та розширити, як економічні, екологічні, енергетичні та соціальні. Де економічні – зменшення витрат на утилізацію відходів, які можуть бути використані в якості сировини в біогазових технологіях, економія за рахунок заміни інших джерел енергії на біогаз тощо; екологічні – зниження деградації ґрунту, зменшення кількості забруднюючих речовин, що вносяться в ґрунт при використанні мінеральних добрив тощо; соціальні [3] – поліпшення соціальних умов та зниження врожайності від застосування біодобрив порівняно з аналогічним ефектом стосовно традиційних добрив та економії коштів на придбання добрив; енергетичні – зведені ексергетичні витрати на виробництво продукції, питомі енергетичні показники виробництва продукції.

Оскільки все більша увага приділяється раціональному споживанню свіжої води, то зниження її споживання призводить до того, що стічні води переробних та очисних підприємств стають більш концентрованими при зменшенні їхньої загальної кількості [3, 4]. Для підприємств відповідне очищення стічних вод представляє серйозну проблему. Це відбувається на тлі зростаючого тиску на підприємства з боку контролюючих органів. Усе частіше перед підприємствами постають проблеми пошуку ефективних, надійних в експлуатації, гарантуючих стабільну і високу якість очищення стічних вод. Отже, економія свіжої води є проблемою, яка частково входить у всі вищеописані критерії якості системи.

Проаналізована біогазова технологія з розділенням відпрацьованого субстрату на тверду і рідку фази. Запропоновано і досліджено метод використання рідкої фази в процесі приготування субстрату з метою економії свіжої води. Складені балансові рівняння для технологічних процесів: підготовки субстрату з використанням гною і свіжої води; розділення відпрацьованого субстрату на тверду і рідку фази; підготовки

субстрату з використанням гною, води та рідкої фази. Балансові рівняння, застосовані для визначення раціональних умов застосування рідкої фази в процесі підготовки субстрату для подачі в біореактор, наведені нижче.

Балансові рівняння формування свіжого субстрату з використанням гною і води

$$\begin{cases} G_{\text{суб}}(1 - \bar{W}_{\text{суб}}) = G_{\text{гн}}(1 - \bar{W}_{\text{гн}}) \\ G_{\text{суб}} = G_{\text{гн}} + G_{\text{в}} \\ G_{\text{суб}} \cdot \bar{W}_{\text{суб}} = G_{\text{гн}} \cdot \bar{W}_{\text{гн}} + G_{\text{в}} \end{cases} \quad (1)$$

Балансові рівняння розділення відпрацьованого субстрату на тверду і рідку фази

$$\begin{cases} G_{\text{суб}} = G_{\text{т.ф.}} + G_{\text{р.ф.}} \\ G_{\text{суб}} \cdot (1 - \bar{W}_{\text{суб}}) = G_{\text{т.ф.}}(1 - \bar{W}_{\text{т.ф.}}) + G_{\text{р.ф.}}(1 - \bar{W}_{\text{р.ф.}}) \\ G_{\text{суб}} \cdot \bar{W}_{\text{суб}} = G_{\text{т.ф.}} \cdot \bar{W}_{\text{т.ф.}} + G_{\text{р.ф.}} \cdot \bar{W}_{\text{р.ф.}} \end{cases} \quad (2)$$

Балансові рівняння формування свіжого субстрату з використанням гною, води та рідкої фази

$$\begin{cases} G_{\text{суб}}(1 - \bar{W}_{\text{суб}}) = G_{\text{гн}}(1 - \bar{W}_{\text{гн}}) + G_{\text{р.ф.}}(1 - \bar{W}_{\text{р.ф.}}) \\ G_{\text{суб}} = G_{\text{гн}} + G_{\text{р.ф.}} + G_{\text{в}} \\ G_{\text{суб}} \cdot \bar{W}_{\text{суб}} = G_{\text{гн}} \cdot \bar{W}_{\text{гн}} + G_{\text{р.ф.}} \cdot \bar{W}_{\text{р.ф.}} + G_{\text{в}} \end{cases} \quad (3)$$

де $G_{\text{суб}}$ – добове завантаження субстрату в реактор, т/добу; $G_{\text{гн}}$ – добова витрата гною, т/добу, який надходить в реактор БГУ в складі субстрату; $G_{\text{р.ф.}}$ – добовий вихід рідкої фракції з сепаратора після розділення фаз відпрацьованого в біореакторі субстрату, т/добу; $\bar{W}_{\text{суб}}$ – вологість підготовленого субстрату, яким завантажується біореактор, $\bar{W}_{\text{р.ф.}}$ вологість рідкої фази, після сепарації відпрацьованого в біореакторі субстрату; $G_{\text{гн}}^{\text{max}}$ – добова максимальна витрата гною, т/добу, який надходить в реактор БГУ в складі субстрату, т/добу; $G_{\text{р.ф.}}^{\text{max}}$ – добовий максимальний вихід рідкої фракції з сепаратора після розділення фаз відпрацьованого в біореакторі субстрату, т/добу; $G_{\text{в}}^{\text{max}}$ – максимальна витрати води; $\Delta G_{\text{в}}$ – відношення витрати води до максимально можливої витрати; $\Delta G_{\text{гн}}$ – відношення витрати гною до максимально можливої витрати.

За допомогою балансових рівнянь (1) за умов $G_{\text{суб}} = 75,9$ т/добу і $\bar{W}_{\text{суб}} = 0,92$; $\bar{W}_{\text{гн}} = 0,8$; $0,84$; $0,86$ отримуємо значення $G_{\text{в}}$ і $G_{\text{гн}}$, які приймаємо за максимальні в процесі аналізу $G_{\text{в}}^{\text{max}}$ і $G_{\text{гн}}^{\text{max}}$.

З використанням балансових рівнянь (2) за умов $G_{\text{суб}} = 75,9$ т/добу; $\bar{W}_{\text{суб}} = 0,92$; $\bar{W}_{\text{т.ф.}} = 0,7$; $\bar{W}_{\text{р.ф.}} = 0,99$; визначаємо значення $G_{\text{р.ф.}}$, для подальшого аналізу приймаємо $G_{\text{р.ф.}}^{\text{max}}$.

За допомогою балансових рівнянь (3) за умов $G_{\text{суб}} = 75,9$ т/добу; $\bar{W}_{\text{суб}} = 0,92$; $\bar{W}_{\text{р.ф.}} = 0,99$; $\bar{W}_{\text{гн}} = 0,8$; $0,84$; $0,86$; $G_{\text{р.ф.}}^{\text{max}}$; $G_{\text{р.ф.}} = \psi \cdot G_{\text{р.ф.}}^{\text{max}}$, де $\psi = 0,1$; $0,25$; $0,5$ визначаємо поточні розмірні значення $G_{\text{гн}}$ і $G_{\text{в}}$, а потім безрозмірні $\Delta G_{\text{гн}} = G_{\text{гн}} / G_{\text{гн}}^{\text{max}}$, $\Delta G_{\text{в}} = G_{\text{в}} / G_{\text{в}}^{\text{max}}$.

Нижче наводимо результати чисельних досліджень біогазової технології з поверненням рідкої фази у технологічний цикл. Нехай масова витрата субстрату складає 75,9 т/добу, відносна вологість рідкої фракції – 0,99 і в технологічний цикл повертається від 10% до 50% рідкої фракції, відносна вологість свіжого гною – 0,8; 0,84; 0,86.

За результатами розрахунків будемо графічні залежності $G_{\text{в}} / G_{\text{в}}^{\text{max}} = f(\psi)$, $G_{\text{гн}} / G_{\text{гн}}^{\text{max}} = f(\psi)$.

Для вхідних умов, що були прийняті для аналізу, повернута у цикл рідка фракція змінюється в розмірі від 10% до 50% (рис. 1, 2).

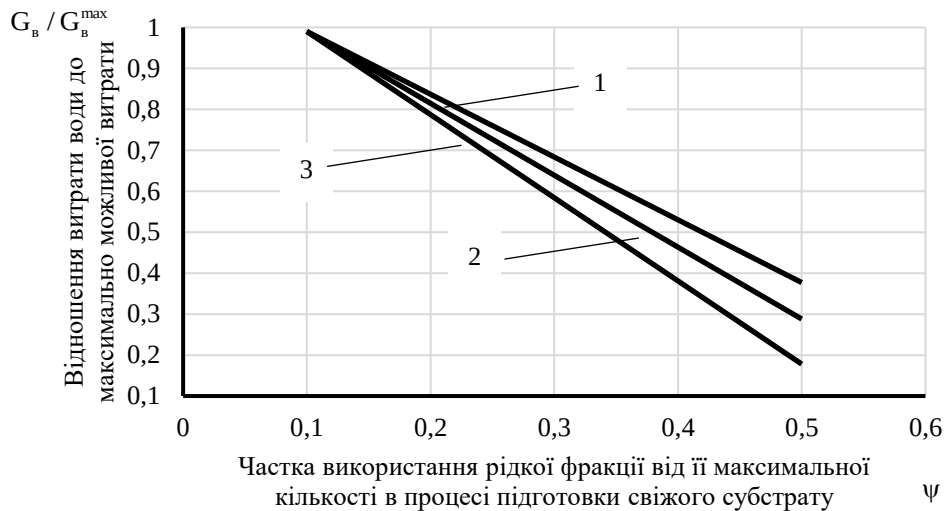


Рис. 1. Відношення витрати води, до максимально можливої витрати
1 – $\bar{W}_{гн} = 0,8$; 2 – $\bar{W}_{гн} = 0,84$; 3 – $\bar{W}_{гн} = 0,86$.

Аналіз отриманих на рисунку 1 залежностей дає змогу зробити висновок, що повернення в технологічний процес біогазової установки відпрацьованої рідкої фракції дасть змогу зекономити до 70 % свіжої води за умов стаціонарного завантаження реактора.

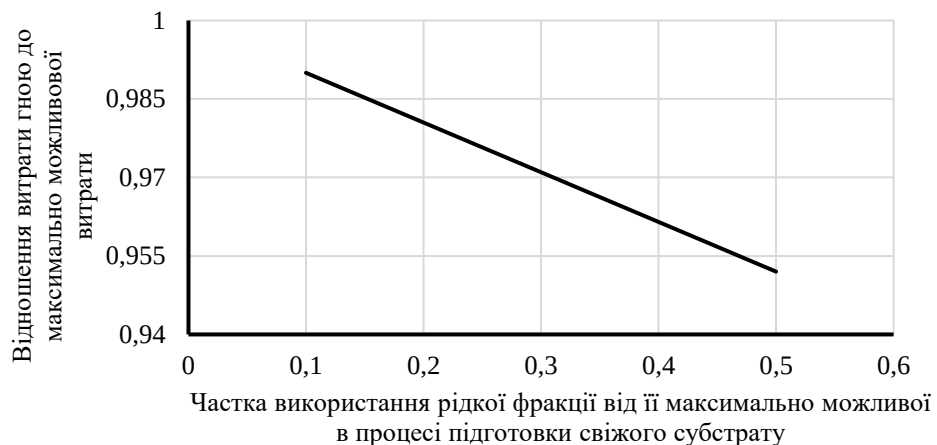


Рис. 2. Відношення витрати гною, до максимально можливої його витрати, за умов вологості гною 0,8 – 0,86

Залежність з рисунку 2 може використовуватись для регулювання витрати свіжого гною, тобто під час повернення у реактор рідкої фракції спостерігається зменшення необхідної витрати свіжого гною у діапазоні до 5%. Дане явище є суттєвим за умов нестачі свіжої сировини у певні періоди року.

Висновки

З метою економії води запропоновано метод часткового заміщення її рідкою фазою відпрацьованого субстрату в процесі приготування свіжого субстрату для подачі в біореактор біогазової установки.

Для визначення умов ефективного застосування запропонованого методу складені балансові рівняння технологічних процесів підготовки свіжого субстрату з використанням гною і свіжої води, а також з використанням гною, води та рідкої фази, розділення відпрацьованого субстрату на рідку і тверду фази.

Повернення в технологічний процес біогазової установки рідкої фракції в кількості 10 – 50 % від одержаної із відпрацьованого субстрату дасть змогу зекономити до 70 % свіжої води за умов стаціонарного завантаження реактора.

За умов використання рідкої фази для підготовки субстрату зменшення частки свіжого гною знаходиться в межах 5%, що не призведе до помітного зменшення виробітку біогазу.

Література

1. Пустовойтенко В. П. Концепція реконструкції очисних споруд з утилізацією твердих побутових відходів шляхом метанізації / В. П. Пустовойтенко, О. О. Серьогін, О. М. Сегай, О. В. Василенко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. - 2011. - Вип. 4. - С. 46-57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu_teh_2011_4_8 (дата звернення: 17.06.2017).
2. Шевченко Р. І. Еколого-економічне обґрунтування біогазових технологій / Р. І. Шевченко, В. В. Компанієць // Харчова наука і технологія. - 2012. - № 3. - С. 87-89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khmit_2012_3_32 (дата звернення: 17.06.2017).
3. Іванько А. О. Енергозабезпечення підприємств харчової промисловості // Офіційний веб-сайт ЧНПП "СІНАПС" / Когенерація в Україні. URL: <http://www.cogeneration.com.ua/ru/analytics/fields/1192191343/> (дата звернення: 17.06.2017).
- Ткаченко С. Й. Формування об'єкта-гіпотези за умов синтезу біогазової установки Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Іщенко К. О. / XLV Науково-технічна конференція факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання м. Вінниця, ВНТУ, 2017р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2385/2388> (дата звернення: 17.06.2017).

УДК 338.45.003.13:620.91

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ОЛІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Бурдо О.Г., д-р техн.наук, професор¹, Бандура В.М., к.т.н., професор²

Маренченко О. І., аспірант, Пилипенко Є. О., магістрант¹,

¹Одеська національна академія харчових технологій

²Вінницький національний аграрний університет

ENERGY REVIEW OF OIL PRODUCTION

Burdo O.G., Dr.Tech.Sci., Professor¹, Bandura V.M., Ph.D., Professor²

Marenchenko O.I., postgraduate student, Pilipenko Ye.O., mastership¹,

¹Odessa National Academy of Food Technologies

²Vinnitsia National Agrarian University

Abstract. The oil production according to the hierarchical technological scheme according to the levels: "enterprise - shops - technological lines - equipment" is considered. The methods of energy audit determine the monthly indicators of production capacity, the cost of heat and electricity, and the consumption of drinking and technical water. Determined specific costs of resources, their comparison with the regulations. According to the audit, heat balance was determined and a heat loss map was constructed. A complex of energy-efficient projects and a number of innovative projects that are capable of substantially improving the oil technologies are offered.

Анотація. Розглянуто олійне виробництво за ієрархічною технологічною схемою за рівнями: «підприємство – цехи – технологічні лінії – обладнання». Методами енергетичного аудиту визначено щомісячні показники потужності виробництва, витрати теплової та електричної енергії, витрати питної та технічної води. Визначено питомі витрати ресурсів, проведено їх порівняння із регламентом. За даними аудиту визначено теплові баланси та побудовано карту втрат теплоти. Запропоновано комплекс енергоефективних проектів та низку інноваційних проектів, які спроможні суттєво удосконалити олійні технології.

Keywords. Oil production, energy audit, energy efficiency, innovation projects.

Ключові слова. Олійне виробництво, енергетичний аудит, енергоефективність, інноваційні проекти.

Вступ. Виробництво рослинної олії, здійснюване за схемою форпресування- екстракція, представляє складну багаторівневу систему, об'єктом переробки якої є олійна сировина. Аналіз науково-технічних джерел [1 - 3] дозволяє вважати виробництво рослинної олії великою, складною та ієрархічною технологічною системою, що складається з комплексу підсистем: ліній, установок, машин та апаратів, об'єднаних загальною функцією мети - отримання олії і шроту з олійного насіння. Дане виробництво характеризується високим рівнем ресурсних витрат і значними викидами теплоти, газових і водних стоків в навколишнє середовище, що визначає необхідність енергетичного аудиту.

Аналіз проблеми та формулювання гіпотез. Моделювання технологічних комплексів олійного виробництва проводилось за рівнями їх ієрархії. По-перше, вони проводилися в рамках тієї чи іншої підсистеми з урахуванням її функціонального призначення. По-друге, послідовність системних процедур ґрунтувалася на принципі низхідної ієрархії аналізу і висхідної ієрархії синтезу у вирішенні поставлених завдань. По-третє, схема дослідження базувалася на послідовному просуванні по всьому комплексу

взаємопов'язаних етапів, прямих і зворотних зв'язків між ними з їх енерготехнологічною оцінкою для виявлення потенційних джерел теплової енергії, яку можна утилізувати в технологічних процесах. По-четверте, єдність методологічного підходу і його ефективність на кожному етапі дослідження базувалися на розробці на цій основі конкретних технічних рішень для кожної стадії і визначення перспективних напрямів майбутніх досліджень. Інструментом аналізу була методологія енергетичного менеджменту.

Формулюється гіпотеза, що проведення системного аналізу методами енергетичного менеджменту дозволить визначити на основі теплових балансів карту теплових викидів, на базі якої розробити обґрунтовані проекти з підвищення ефективності використати енергії в олійних технологіях.

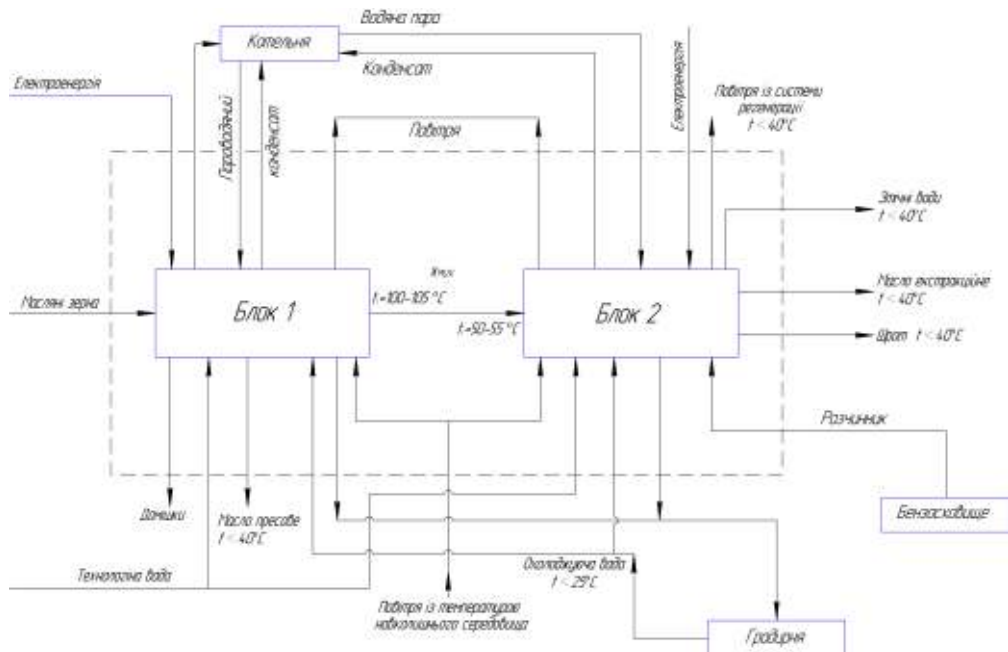


Рис 1. Блочна структура виробництва рослинної олії.

Енергетичний аудит підприємства. На першому рівні ієрархії розглядалось підприємство, на другому ключові технологічні цехи – виробництва пресованої олії (ВПО) і олійно – екстракційне виробництво (ОЕВ). До третього рівня віднесено технологічні лінії: підготовки олійного насіння до відтикання (ПНВ); віджиму олії (ВО); підготовки сировини до екстрагування (ПСЕ); екстрагування олії (ЕО); регенерації розчинника (РР); відгину розчинника з шроту ВРШ.

Як об'єкт дослідження систему виробництва рослинної олії, що функціонує за схемою форпресування-екстракція, доцільно розчленувати на дві основні підсистеми - блоки 1 і 2 (рис.1). Перший блок – виробництво пресованої олії (ВПО) – об'єднує кілька модулів, що складаються з комплексу технологічних етапів, в яких здійснюються механічні і вологообмінні процеси в системі волога-олійний матеріал. Другий блок – олієекстракційне виробництво (ОЕВ) – включає ряд модулів, що складаються із сукупності технологічних стадій, в яких протікають дифузійні тепломасообмінні процеси в середовищах олійний матеріал-розчинник, міццела-газова фаза і шрот-газова фаза.

Розглянемо структуру виробництва рослинної олії, що складається з двох підсистем – блоків ВПО і ОЕВ. Для цього обмежимо блоки умовною контрольною поверхнею у вигляді пунктирної лінії, яка відокремлює їх від зовнішнього середовища (рисунк 1). Тоді можна виділити зовнішні вхідні та вихідні зв'язки, що забезпечують обмін речовини аналізованої системи із зовнішнім середовищем, які можуть бути основними та допоміжними, а також енергетичні та внутрішні зв'язки – міжблочні. Слід зазначити, що всі наведені основні та допоміжні зв'язки виконують аналогічні функції і в розглянутих нижче структурах відповідних рівнів ієрархії.

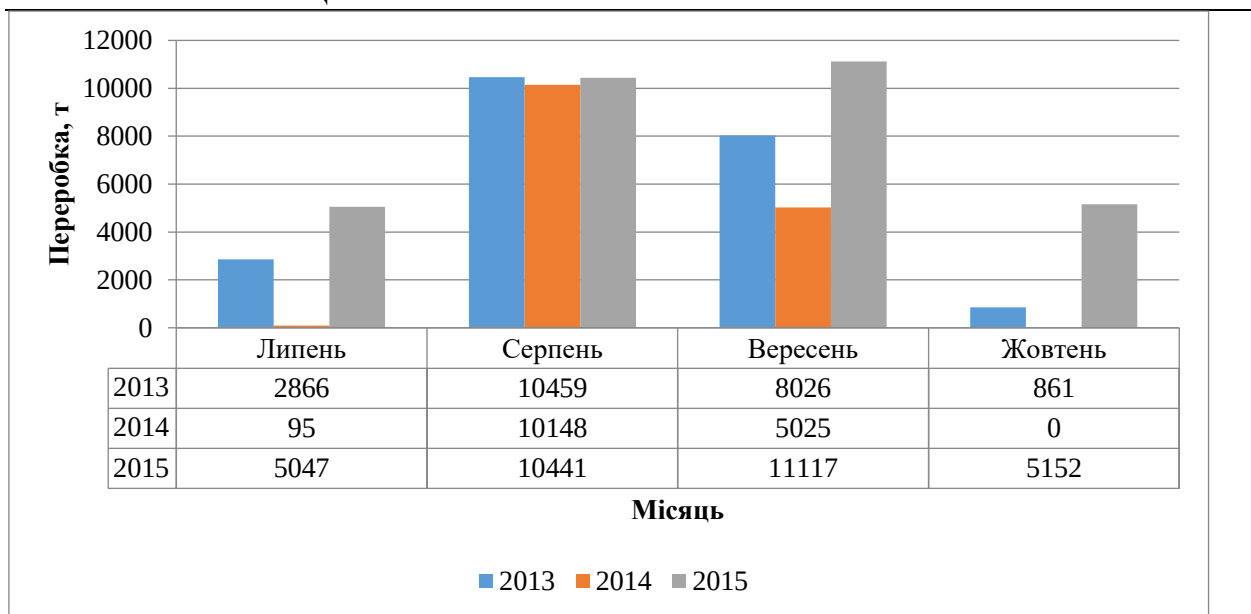


Рис.2. Щомісячна продуктивність виробництва.

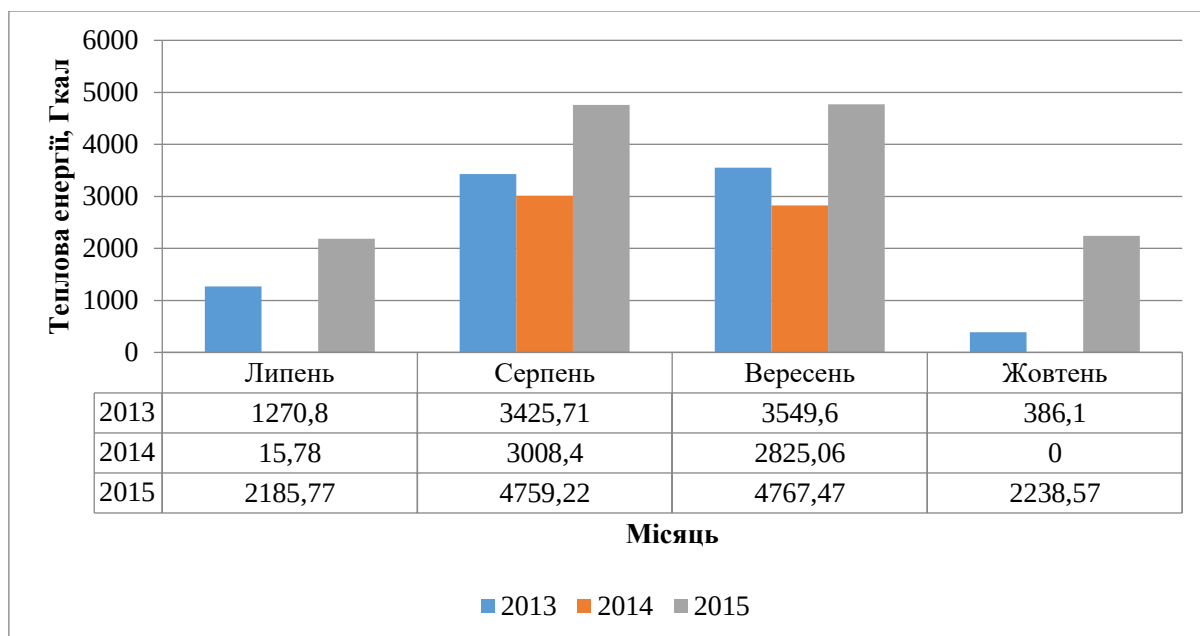


Рис.3. Щомісячні витрати теплової енергії.

Як видно з рис. 1 в навколишнє середовище викидається два потужних потоки – теплота з повітрям після охолодження макухи та стічні води.

Енергетичний моніторинг проведено по об'єктах олійного виробництва, послідовно, у відповідності їх ієрархічного рівня.

Дослідження проводились на типовому оліє переробному підприємстві. Завдання аудиту було визначити питомі витрати ресурсів при виробництві олії з рапсу. По - перше, за звітною документацією побудовано помісячна продуктивність виробництва (рис.2) та витрати теплової енергії (рис.3).

Ключовими параметрами, що характеризують енергетичну ефективність виробництва вважаються [] показники питомих витрат теплової енергії. Тому проведено розрахунки параметра j та порівняння їх із регламентом (рис.4).

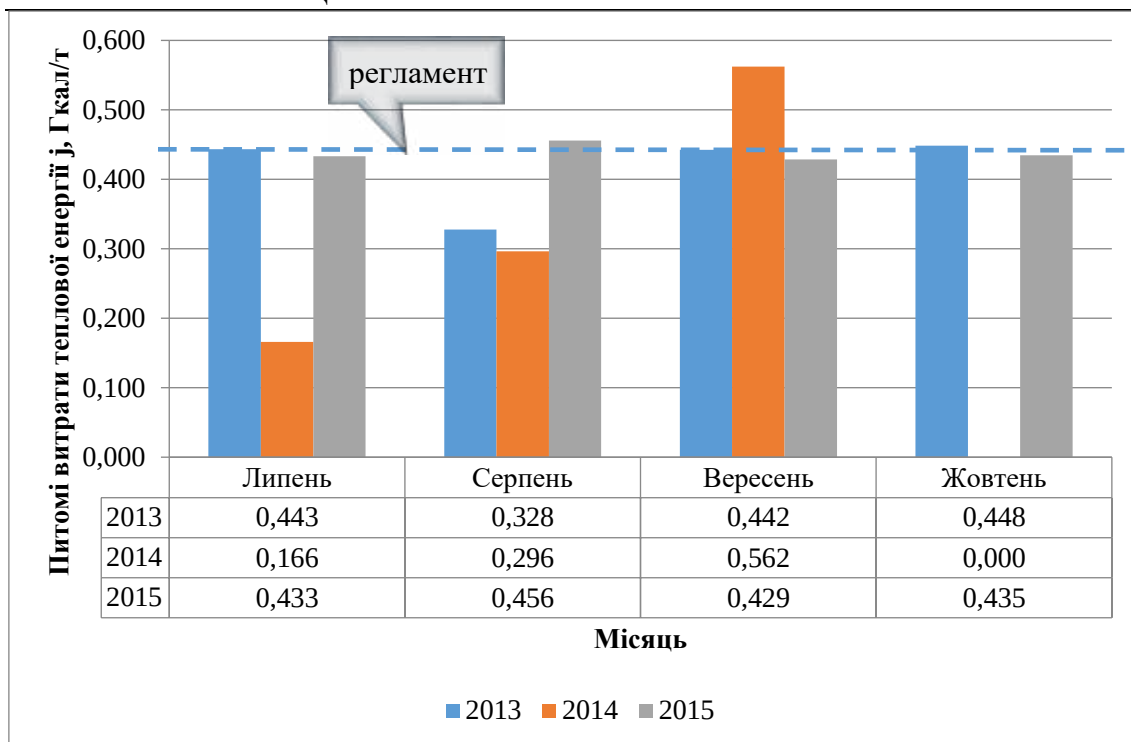


Рис.4. – Щомісячні питомі витрати теплової енергії.

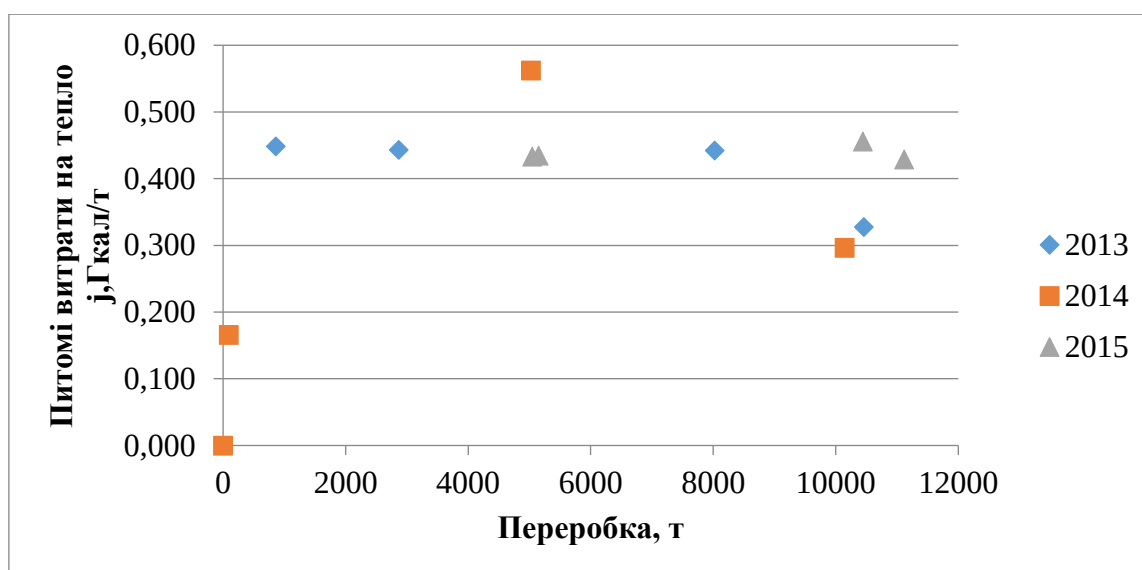


Рис.5. Залежність j від потужності виробництва.

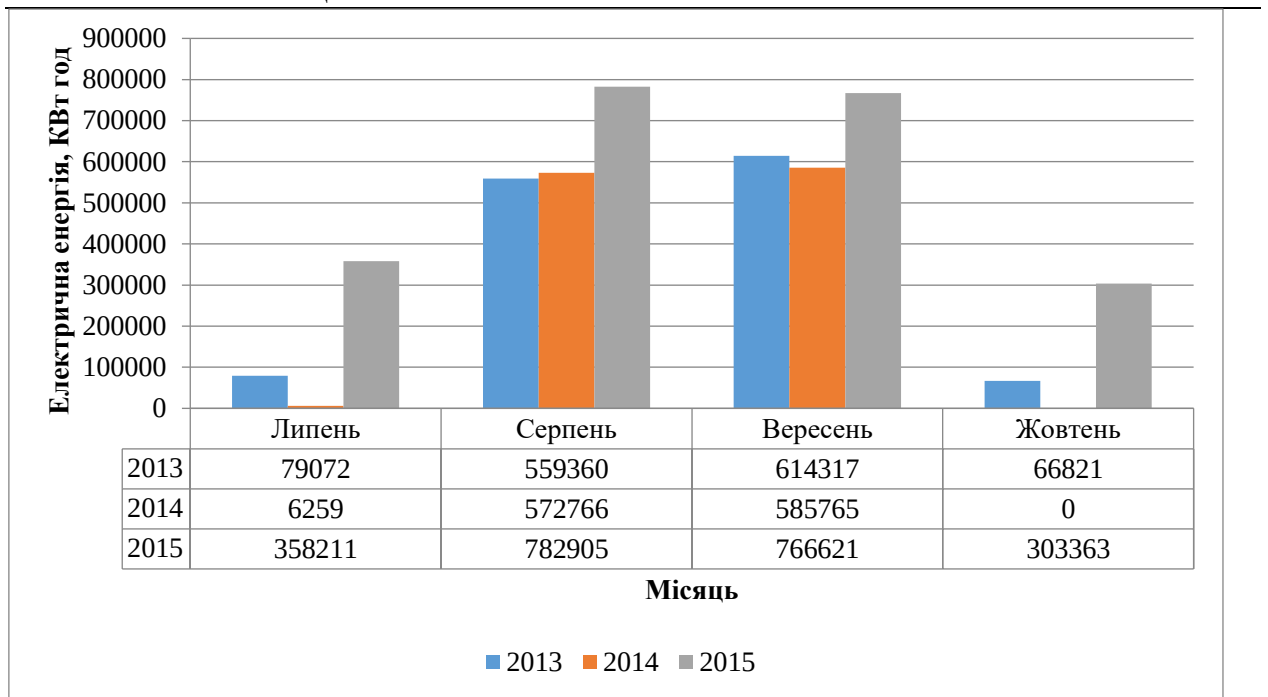


Рис.6. Щомісячні витрати електричної енергії.

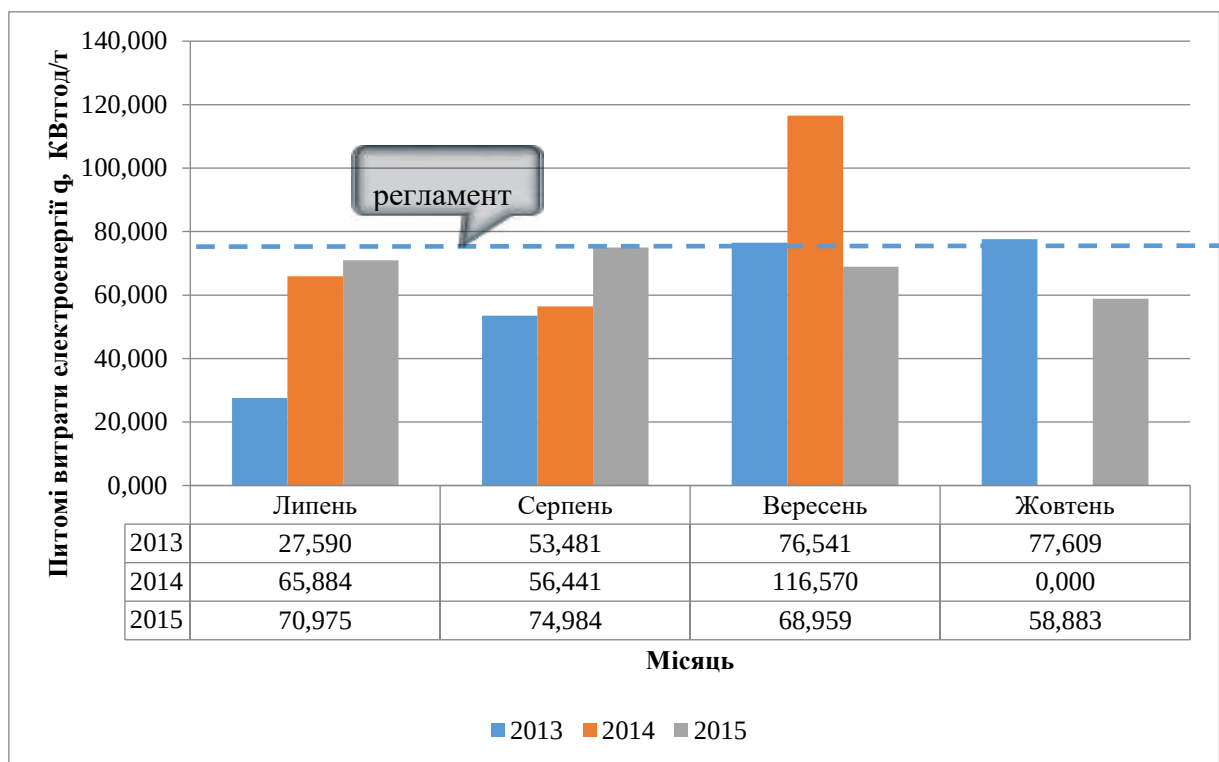


Рис. 7. Щомісячні питомі витрати електричної енергії.

Данні енергетичного аудиту (рис.4) свідчать, що виробництво має суттєві резерви підвищення енергетичної ефективності навіть якщо щомісячно тільки притримуватись регламенту. Важливий вплив на витрати енергетичних ресурсів має завантаження підприємства сировиною, тобто функціонування обладнання при високих ККД. Тому зроблено розрахунки і визначено, чи є залежність j від потужності виробництва (рис.5).

Аналіз роботи підприємства (рис.5) свідчить, що стабільні питомі показники по тепловій енергоємності досягнуто в 2013 та 2015 роках. В основному, ці показники дорівнювали регламенту. Але, є деяка тенденція зменшення j при зростанні потужності виробництва.

Аналогічні дослідження проведено для споживання електричної енергії (рис.6,7).

Як правило, питомі витрати електричної енергії не перевищують регламенту (рис.7). Далі визначимо, чи є залежність цих витрат від продуктивності виробництва. Обробка даних енергетичного аудиту наведена на рис. 8.

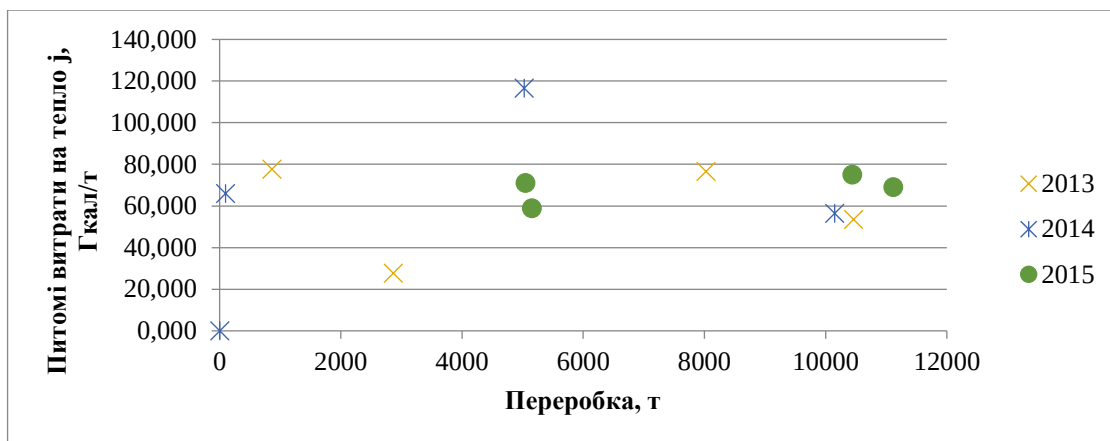


Рис.8. Залежність питомих витрат електроенергії від потужності виробництва.

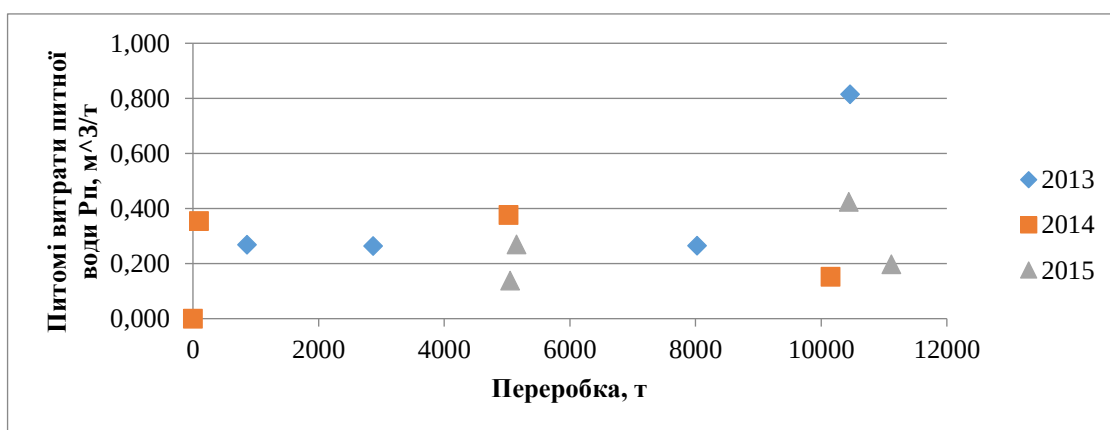


Рис.9. Залежність питомих витрат питної води від потужності виробництва.

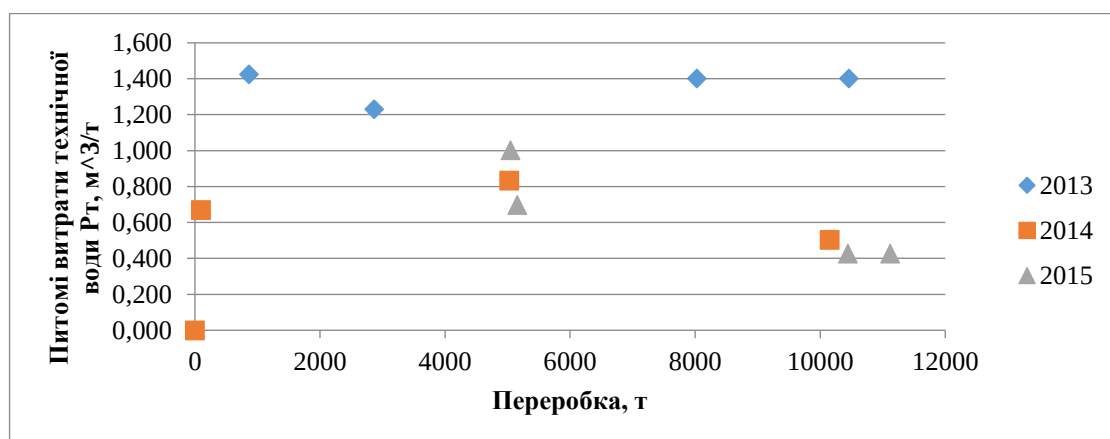


Рис.10. Залежність питомих витрат технічної води від потужності виробництва.

Аналіз (рис.8) дозволяє зробити висновок, що при досить нестабільних показниках питомих витрат електроенергії є тенденція зменшення цього параметру при зростанні потужності виробництва.

Проведено дослідження витрат питної та технічної води, визначено залежність питомих витрат води від потужності виробництва (рис.9, 10).

Видно (рис.9, 10), що є проблеми при контролі використання водних ресурсів. Скорочення витрат води приведе не тільки до економії коштів, але й до зменшення навантаження на довкілля, в зв'язку зі зменшенням витрат стоків.

На основі обробки результатів енергетичного аудиту проведено визначення теплових балансів та карти теплових викидів на рівні основних технологічних цехів.

Довідка теплових потоків відповідно (рис.1) наведена в табл.1.

Таблиця 1. Характеристика енергетичних потоків блоків ВПО і ОЕВ

Найменування зв'язку	Напрямок і тип зв'язку	Технологічні параметри потоку і призначення
1	2	3
Пресо́ва олі́я	Зовнішній основний матеріальний потік	Температура олії не більше 40 °С
Екстракційна олі́я	Те ж	Те ж
Шрот	»	Температура шроту не більша ніж на 5°С вище температури навколишнього середовища
Атмосферне повітря	Зовнішній вхідний допоміжний потік	Агент для охолодження жмиху в блоці 1 і вентиляції в блоках 1 і 2
Охолоджуюча вода з градирні	Те ж	Для охолодження олії в блоках 1 та 2, конденсації вторинних парів. Відводиться з температурою до 30 °С
Повітря	Те ж	У блоці 2 температура не вище 40°С
Стічні води	Те ж	Температура не вище 40°С
Паропроводи	Те ж	Водяна пара 0,1 МПа
Лінія відведення конденсату в котельню	Зовнішні вихідні енергетичні зв'язки	Конденсат водяної пари, температурою менше 100°С
Лінія відведення охолоджуючої води в градирню	Зовнішні вихідні зв'язки	Температура не більше 30°С

На основі даних (табл.1) та схеми (рис.1) визначено пароконденсатні баланси, енергетичні баланси основних матеріальних потоків (олійний матеріал і пресо́ва олі́я) і зовнішніх вхідних і вихідних допоміжних зв'язків – потоків повітря. Розрахунки проведено для олієекстракційного заводу з типовою продуктивністю по насінню соняшника 450 т/добу.

На рисунку 8 представлені результати аналізу системи волого-теплової обробки (ВТО) і віджиму олії (блок 1), що відповідають ділянці міжблочного зв'язку олійного матеріалу (крупка), яка піддається охолодженню навколишнім повітрям, і фрагмент модуля екстрагування блоку 2.

Як видно з цих діаграм, розрахованих за технологічним і тепловим балансом зазначеного типового олієекстракційного заводу [288], теплота, що відноситься з повітрям при охолодженні жмиху, складає 205 кВт (738 · 10 кДж/год). Розрахунок за уточненими значеннями теплоти пароутворення розчинника з масляної місцели [90] показує, що такої потенціальної кількості теплоти достатньо для випарювання 3000 кг/год розчинника з місцели.

По суті отримано карту теплових викидів різних відпрацьованих теплоносіїв (рис.8,б) та значення не тільки потужності викидів, але й їх потенціалу (рис.8,а).

Охолодження макухи завжди здійснюють від 100-105°С до 50-55°С. В результаті чого відбувається скидання теплової енергії, яка відводиться з повітрям в навколишнє середовище, що безумовно є тепловим забрудненням і вимагає відповідного рішення щодо його усунення.

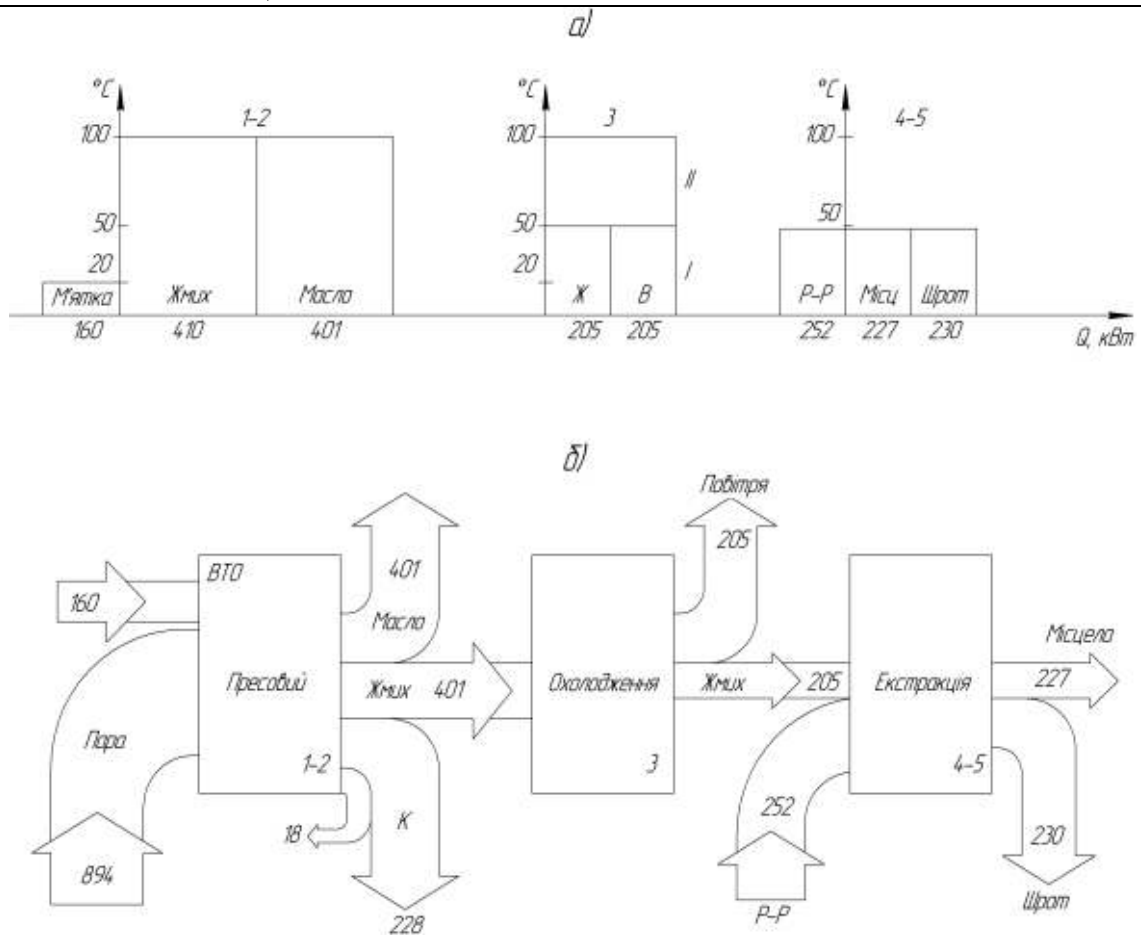


Рисунок 11. Енергетичні баланси (а) і карта теплових викидів (б) відпрацьованих потоків.

Найпотужнішими споживачами теплової енергії є об'єкти другого блоку (рис.1). Тому виконано окремий аналіз об'єктів ОЕВ (табл.2).

Таблиця 2. Характеристика зв'язків енергетичних потоків блоку ОЕВ

Назва і номер зв'язку	Напрямок і тип зв'язку	Технологічні параметри потоку і призначення
1	2	3
Газоповітряна суміш, №5	Допоміжний зв'язок модулів (вихідний А та вхідний С)	Суміш повітря і пари розчинника
Вторинна пара модуля В, №6	Допоміжний зв'язок модулів (вихідний В та вхідний С)	Температура 65-105°C
Неконденсовані пари розчинника, № 7	Допоміжний зв'язок модулів (вихідний А та вхідний модуля С й ділянки В ₀).	Температура 45-50°C
Конденсат розчинника та води (ділянка В ₀), № 8	Допоміжний зв'язок модулів (вихідний В та вхідний С)	Температура 40-45°C
Вторинна пара із шроту, №10	основний міжмодульний зв'язок (вихідний Б та вхідний В (ділянка В ₀))	Для соняшника температура 70-75 °C, а для сої - 80-85 °C.
Повітря після охолодження шроту, №12	Вихідний допоміжний зв'язок модуля Б.	Температура не більше 80°C

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Гаряча вода, №13 Розчинник, №13	Вхідний міжмодульний зв'язок модуля Б. Вихідний зв'язок модуля С.	Температура 80-85°C. Для ліній Де-Смет, НД-1250 Температура 40-45°C. Для ліній Європа-Краун
Вода із шламом, №14	Між модульний зв'язок (вхідний С та вихідний Б)	Температура 85°C
Стічні води, №15 (рисунок 1.5)	Основний вихідний зв'язок модуля С	Кількість 1,5-5,5 м³/год. Температура до 40°C
Повітря, №16 (рисунок 1.5)	Допоміжний вихідний зв'язок модуля С	Вміст парів розчинника не більше 20 мг/м³

База даних з енергетичного аудиту дозволяє розробляти проекти по підвищенню ефективності використання енергії на олійному виробництві.

Формування енергоефективних проектів. На основі проведеного аналізу пропонуються проекти підвищення енергетичної ефективності олійного виробництва. Проекти класифіковано по категоріям: ОТ – організаційно-технічні; ТУ – тепла утилізація; ТІ – тепла ізоляція; ТН – тепло насосна термотрансформація; ІТ – інноваційні енерготехнології (рис.12).

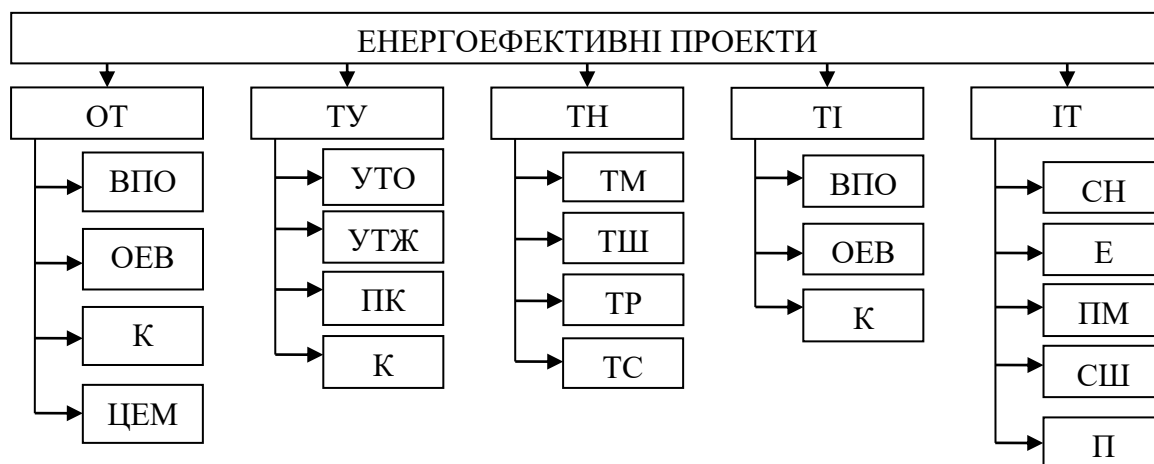


Рис. 12. Класифікація напрямків підвищення ефективності енерготехнологій олійного виробництва.

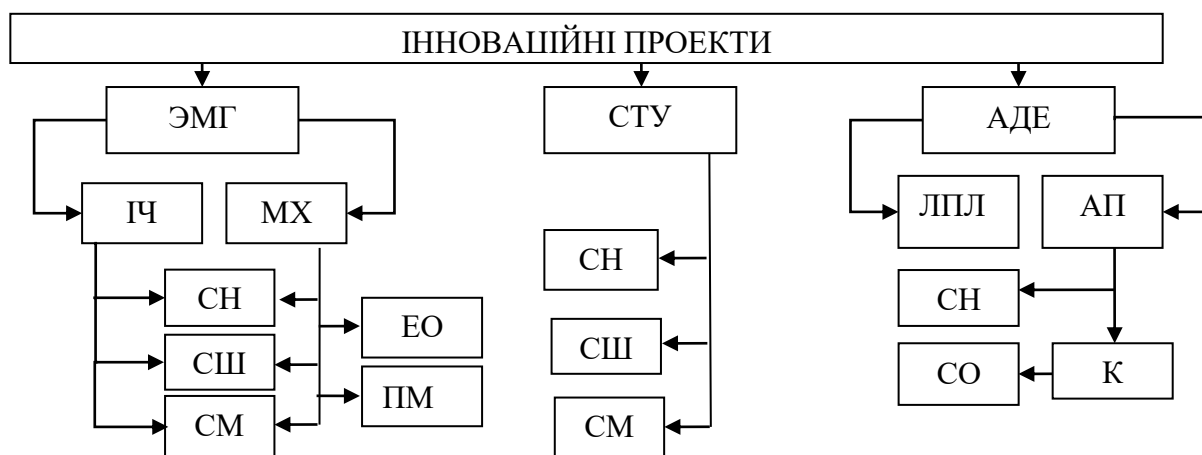


Рис.13. Класифікація інноваційних проектів.

Пріоритетними проектами на першому етапі мають бути організаційно-технічні. Вони не потребують матеріальних затрат та спроможні суттєво скоротити споживання енергетичних ресурсів. Тут резерви в узгодженні потужності котельні (К) із роботою технологічних цехів ВПО та ОЕВ, в забезпеченні функціонування обладнання при максимальних енергетичних ККД. ОТ- проекти мають формуватися та

регулюватися центром енергетичного моніторингу (ЦЕМ), який необхідно створювати негайно. Світова практика [] показує, що такі структури мають рентабельність до 500%.

Утилізація теплоти має сенс на потоках олії (УТО), жмиху (УТЖ), конденсату водяної пари та повернення його в котельню (ПК), та для топкових газів самої котельні (К). Технічні рішення для цих проектів мають використовувати сучасні засоби теплопередачі, наприклад теплові труби.

Для олійного виробництва характерна велика потужність низько потенційних потоків із потенціалом до 50 °С (рис.12). Їх утилізація потребує систем теплової трансформації, теплових насосів. Так має бути використана енергія мезги (ТМ), шроту (ТШ), повітря та стічних вод (ТС).

Теплову ізоляцію доцільно посилювати на огороженнях цехів, тепло потужних технологічних апаратах та в котельні. Конкретні проекти параметрів теплової ізоляції визначаються по результатах енергетичного аудиту та розрахунку економіки проектів.

Всі сформульовані вище проекти базуються на досягнутому в світовій практиці рівні. Їх реалізація потребує впровадження кращої світової практики. Модернізація, технічне переоснащення технологій, рух у напрямку перевищення світового рівня потребує інноваційних науково-технічних рішень. Він може базуватися на прогресивних дослідженнях і досягненнях [] вітчизняних наукових шкіл. Сутність таких проектів наведено на рис. 13.

Особливі перспективи можна очікувати від впровадження сучасних принципів ефективного підведення енергії, використання електромагнітних генераторів (ЕМГ). Генератори інфрачервоного діапазону (ІЧ) перспективні в сушарках насіння (СН), мезги (СМ) та шроту (СШ). Вони можуть використовуватись в сушарках різних конструкцій як допоміжні, чи як головні реєстри.

Генератори мікрохвильового діапазону (МХ) мають стати базою для створення принципово нових апаратів для екстрагування олії (ЕО) та апаратів для поділення місцели (ПМ).

Вирішувати завдання забезпечення підприємства енергетичними ресурсами можливо за рахунок альтернативних джерел енергії (АДЕ), паливних пелет (АП) із лузги соняшника. Виробництво таких агропелет можна здійснювати на лінії переробки лузги (ЛПЛ). В результаті підприємство може повністю замінити природний газ в системах опалення (СО) та в технології (рис.13).

За результатами енергетичних досліджень методами енергетичного менеджменту [] зроблено наступні висновки.

1. Суттєві резерви зниження витрат енергетичних ресурсів мають організаційно-технічні проекти. Вони вважаються проектами першого пріоритету, а для їх реалізації потрібно організація постійно діючого центру енергетичного моніторингу.
2. Другим етапом удосконалення теплотехнологій вважаються апробовані проекти по утилізації теплових викидів та посилення теплової ізоляції.
3. Третім етапом модернізації теплотехнологій є розробка та впровадження інноваційних проектів в технологіях сушіння, екстрагування та розділення місцели.

Запропоновані принципи інновацій добре зарекомендували себе в різних галузях техніки []. Прикладів використання їх в олійних технологіях в доступній літературі не знайдено. Тому впровадження інноваційних пропозицій потребує постановки комплексних наукових досліджень.

Література

1. Дідур В. А. Обґрунтування режимів сушіння насіння соняшнику вищих репродукцій у киплячому шарі / В. Дідур, О. Ткаченко // Пр. ТДАТА. – Мелітополь, 2005. – Вип. 25. – С. 114–123.
2. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Малин Н. И. – М. : Колос, 2004. – 238 с.
3. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
4. Burdo O.G. Nanoscale effects in food-production technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2005.- Vol.78, Issue 1.- P.90-96.
5. Бурдо О.Г. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях /Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.// Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2015г. – №1 (27) – С.79–85
6. Бурдо О.Г. *Енергетический мониторинг пищевых производств*. Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.

УДК 662.995 : 662.997

OPERATING PARAMETERS OF SORPTION BATTERY OF HEAT ENERGY OPEN TYPE OF HEAT SUPPLY IN SYSTEMS

Belyanovskaya E.A., PhD, docent, Sukhyy K.M., SciD, docent, Kolomiyets O.V., assistant Sukhyy M.P., PhD, professor State Higher Education Institution 'Ukrainian State University of Chemical Engineering', Dnipro, Ukraine

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ СОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІДКРИТОГО ТИПУ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В СИСТЕМАХ

Беляновська О.А., канд. техн. наук, доцент,
Сухий К.М., д-р техн. наук, професор,
Коломієць О.В., асистент, Сухий М.П., канд. техн. наук, професор
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»,
м. Дніпро

Abstract. Operating processes of open-type sorption heat accumulator in heating systems were studied. The algorithm for calculation of its performance is developed. It includes computation of mass transfer coefficient, sorption, useful heat sorption, heat input for heating the sorbent, device casing, water in the humidifier, evaporation of water, heating the sorbed water, desorption, and calculating efficiency coefficient. Operational performance of open-type heat storage device based on the sorbent composite 'silica - sodium sulfate' is estimated. Suggested composite sorbent is obtained from tetraethoxysilane, Na_2SO_4 , ethanol (as a solvent), hydrochloric acid (as a catalyst) and polyionenes served as organic modifiers. The impact of vapor flow velocity on efficiency is taken into account by the coefficient equal sorption value. A monotonic increase of efficiency coefficient while increasing the vapor flow speed and its relative humidity is shown. The efficiency coefficient of heat storage device is shown to be with little to no dependence with regeneration temperature heightened from 90 °C to 110°C. The optimal operating conditions of the heat accumulating device which allow to operate with maximum magnitudes of efficiency coefficients 53 – 57 % are stated to be vapor-air mixture speed 0.6 - 0.8 m/s and relative humidity of 40 – 60 %. The results of simulative experiments and field trials are given. Field tests were carried out in two modes differed with start time. Heat storage device was switched on in the morning or in the evening for load-factoring of electric energy peaks, indoor temperature being kept within limits from 20 °C to 22°C during day or night hours. Correlation between efficiency coefficients deduced from experiments and calculated with suggested algorithm is confirmed. The possibility of reducing the power consumption by applying of the heat accumulators in 2,4 - 90 times versus decentralized heating systems on basis of solid fuel boiler, gas boiler and electric boiler is stated when open-type sorptive heat storage device used. Results of the study can be applied to develop sorptive storage devices in decentralized heat supply and ventilation systems and sorption units for utilization of low-temperature waste heat.

Анотація. Досліджено процеси експлуатації сорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу в системах теплопостачання. Запропоновано алгоритм розрахунку його експлуатаційних характеристик: обчислення коефіцієнта масопередачі, величини сорбції, корисної теплоти сорбції, визначення витрат теплоти на процес, які включають витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, води в баку, випаровування води в баку, нагрівання сорбованої води і десорбцію, а також обчислення коефіцієнта корисної дії. Досліджені експлуатаційні характеристики теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу на основі композитного сорбенту «силікагель – натрій сульфат». Вплив швидкості пароповітряного потоку на коефіцієнт корисної дії враховано за допомогою коефіцієнта, рівного величині адсорбції. Показано монотонне зростання коефіцієнта корисної дії при збільшенні швидкості пароповітряного потоку та його відносної вологості. Виявлена практична відсутність залежності коефіцієнта корисної дії від температури регенерації сорбента. Визначені оптимальні умови експлуатації теплоакumuлюючого пристрою: швидкість пароповітряної суміші 0,6 – 0,8 м/с та її відносна вологість 40 – 60 %, які дозволяють експлуатувати теплоакumuлюючий пристрій з максимальними значеннями коефіцієнта корисної дії 53 – 57 %. Наведені результати модельних та натурних випробувань. Підтверджена кореляція коефіцієнтів корисної дії, встановлених за результатами розрахунків згідно запропонованого алгоритму та дослідним шляхом. Встановлено можливість скорочення енергоспоживання теплоакumuлюючого пристрою в 2,4 – 90 разів в порівнянні систем децентралізованого теплопостачання на основі твердодопаливних, газових та електричних котлів. Результати дослідження можуть бути

використані для розробки адсорбційних акумуляторів в системах децентралізованого теплопостачання та вентиляції, а також сорбційних модулів для утилізації низько-потенційних вторинних енергоресурсів.

Key words: heat storage device, composite sorbent, sorption.

Ключові слова: теплоакumuлюючий пристрій, композитний сорбент, сорбція.

Monotonic growth of fuel costs resulted in unbridled increasing of energy rates demands of equalization of electrical load for electric power system. There are three zones on typical electrical load curve: minimal load (night-time valley) or off-peak demand, intermediate load and maximal or peak load [1]. Imbalance daily load of energy consumption resulted in decreasing of efficiency of generation, transmission and consumption of energy power because of necessity of rather expensive equipment with pessimistic performance working at its nominal load during limited amount of time. Equalization of energy load curves for energy system promotes decreasing requirements to generating capacities and also recurrent expenses for equipment installation due to its effective operation. Methods of electric load regulation are preferentially concerned with load control of plant [2], which includes production process shift to time intervals with low rates by means of batteries and capacitors with high capacity [3] taking into account limitations, these devices being rather expensive and operation complex. An effective method for filling of night-time valley can be using of electric power extra for decentralized heat supply of residential building. Consumers used electrical devices for water or air heating can become driven consumers-regulators storing up energy in out-of-peak periods of power consumption and consuming it in peak periods, electric load curve for energy system being equalized.

Sorptive heat accumulators are one of technical solution for it [4, 5]. These devices heat water for heat supply or air for ventilation in peak periods and consume electric power for sorbent regeneration in night period. Moreover, electric energy consumption can be substantially decreased utilizing solar energy transformed into heat energy in solar collector. Nevertheless, the main factors determining exploiting parameters of such devices are operating characteristics of heat storage materials. Despite the ample quantity of works concerned with synthesis of sorptive materials [6 – 8] operating processes of sorptive heat storage devices are close to be still unstudied.

The base principles of modeling and optimization of cyclic sorptive processes are developed by Lukin [9]. Nevertheless, estimation of operating parameters of heat storage device and selecting of its optimal parameter require of multifactorial studies of heat-and-mass transfer in these media, it being concerned with high material inputs. Consequently, developing of algorithm for calculation of optimal construction and working parameters of heat storage device takes central stage.

The present work is focused on operating processes of open-type heat energy storage device in autonomous heat supply system. According to the aim of present work, the tasks of investigation concerned with:

- developing of algorithm for calculation of efficiency coefficient of open-type heat storage device;
- identification of the key factor effecting weighing with efficiency coefficient of heat storage device;
- determination of operating parameters when maximal efficiency coefficients of heat accumulator obtained.

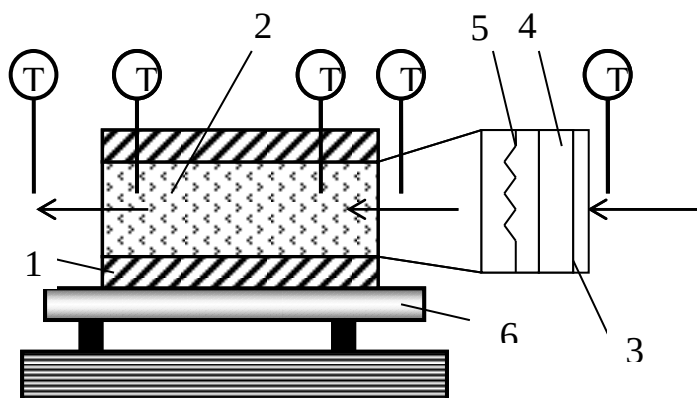
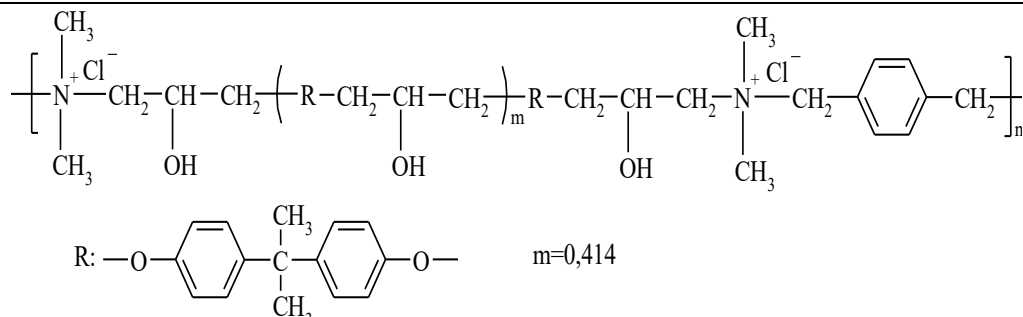


Fig. 1. Test heat storage apparatus: 1 – thermal insulated casing; 2 – heat storage material; 3 – compressor; 4 – air humidifier; 6 – resistance element [10].

Experimental

Design of open-type heat storage device is given in Fig. 1 [10].

As heat storage materials composite sorbents ‘silica gel – sodium sulphate’ are used, they being synthesized from tetraethoxysilane, Na_2SO_4 , ethanol (as a solvent), hydrochloric acid (as a catalyst) and polyionenes served as organic modifiers. The structural formulas of polyionenes are given below [4]:



Diameters of composite sorbents granules are 0.5 – 1.5 mm.

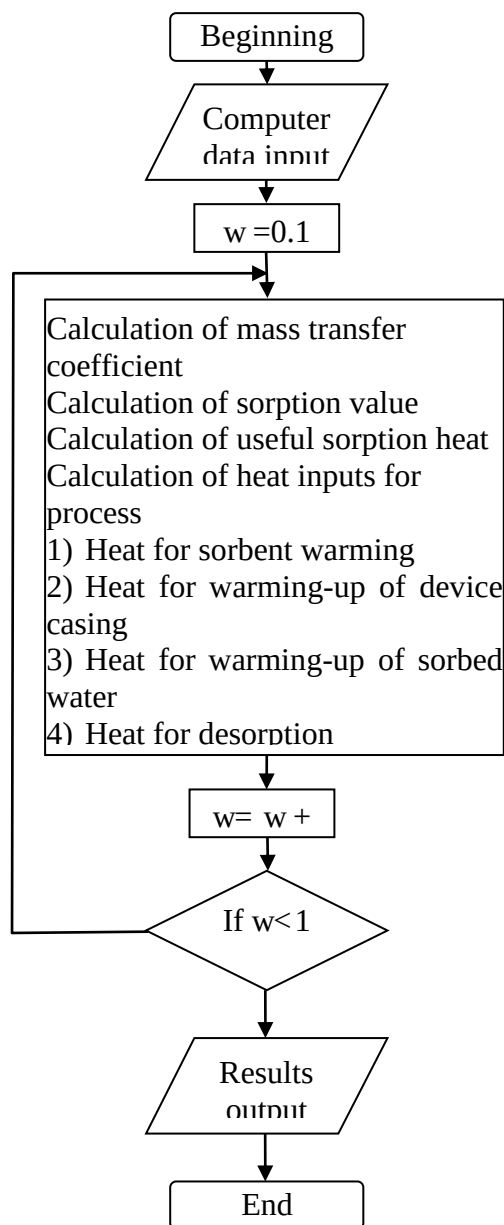


Fig. 2. Control-flow chart for calculation of efficiency factor of sorptive heat storage device.

The heat storage device is operated into two steps. On the first step external air is fanned by compressor 3 into humidifier 4 where its relative degree of humidity is increased to 60 – 80 %. Then humidified air is heated in resistance element 5 to 30 – 40°C because of low rates of sorption at lower temperatures. Furthermore humidified air is directed into heat storage material. After short-term warm-up of heat storage material (15 min.) water sorption from air passed to heat storage material occurs. Exothermic sorption processes results in temperature increasing of both heat storage material and air. Therewith, outlet air temperature is 90 – 115 °C. On the second step (regeneration) heat air pumped through sorbent layer to warm up sorbent to temperatures above 90°C up to desorption.

According to these steps, algorithm for computation of efficiency coefficient open-type heat storage device is suggested, its control-flow chart being given on Fig. 2.

Having been considered operation steps of heat storage device, efficiency coefficient (η) is calculated as %:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{in}} \cdot 100 \quad (1)$$

where Q_u is useful heat (sorption heat), kJ:

$$Q_u = \dot{M}_{sor} \cdot \Delta H_{sor} \quad (2)$$

where M_{sor} is sorbent mass, kg; ΔH_{sor} – sorption heat, kJ/kg;

Q_{in} is heat input, kJ:

$$Q_{in} = Q_{des} + Q_{sor}^h + Q_{cas}^h + Q_w^h + Q_{s.w.}^h + Q_w^{ev} \quad (3)$$

where Q_{des} , Q_{sor}^h , Q_{cas}^h , Q_w^h , $Q_{s.w.}^h$, Q_w^{ev} are heat inputs for desorption, heating of sorbent, device casing, water in the humidifier, sorbed water, water evaporation, kJ.

Heat quantity for warming of materials and device components is calculated by common formula:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t \quad (4)$$

The influence of air-vapor flow rate on efficiency coefficient is taken into account by coefficient A showing sorption value, kg/kg. This coefficient is used for heat costs for desorption

$$Q_{des} = \Delta H_{des} \cdot \dot{M}_{sor} \cdot A \quad (5)$$

and for heating of sorbed water:

$$Q_{s.w.}^h = M_{sor} \cdot \dot{A} \cdot \tilde{N}_w \cdot (t_{reg} - t_{env.}) \quad (6)$$

where $\Delta H_{des} = 2850$ kJ/kg is heat of desorption,

M_{sor} is mass of sorbent, kg, C_w – specific heat of water,

kJ/kg·K, t_{reg} and $t_{env.}$ are temperatures of regeneration and environment, °C.

Sorption value is calculated by formula [11] :

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{sor}}} \cdot V_{\text{air}} \quad (7)$$

where V_{air} is air volume: $V_{\text{air}} = F_{\text{hs}} \cdot w \cdot \tau$, m^3 ; F_{hs} is cross-section area of heat storage device, m^2 , w is air-vapor flow rate, m/s , τ is sorption time, s , C_0 and C are inlet and outlet concentration of air-vapor flow, kg/m^3 [11]:

$$C = \frac{C_0}{e^{\frac{\beta_y (-\tau \cdot w C_0 + H)}{A_{\text{max}}}} + 1}, \quad (8)$$

where H is heat storage device height, m , A_{max} is sorption capacity of sorbent, kg/kg ; β – mass transfer coefficient, s^{-1} , calculated by [12]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_p} + \frac{1}{\beta_{\text{c.s.}}}, \quad (9)$$

where β_y , β_p and $\beta_{\text{c.s.}}$ are mass transfer coefficients for gas phase, pores and coplanar stirring, s^{-1} [12].

According to results of calculations sorption rate is limited with rate of diffusion in pores, that being confirmed by kinetic study of water vapor sorption [10].

Results and discussion

Dependences for efficiency coefficient of open-type heat storage device based on composite silica gel – sodium sulphate vs. air-vapor flow rate calculated by (1) – (9) are given on Fig. 3. Increase in air-vapor flow rate and its relative degree of humidity are followed by rise of efficiency coefficient of heat storage device η . Value η is shown to be near permanent when regeneration temperature increased from 90 to 110°C. Maximum efficiency coefficients of 55 – 57% are evaluated for vapor-air mixture speed 0.6 – 0.8 m/s and relative humidity of 40 – 60%.

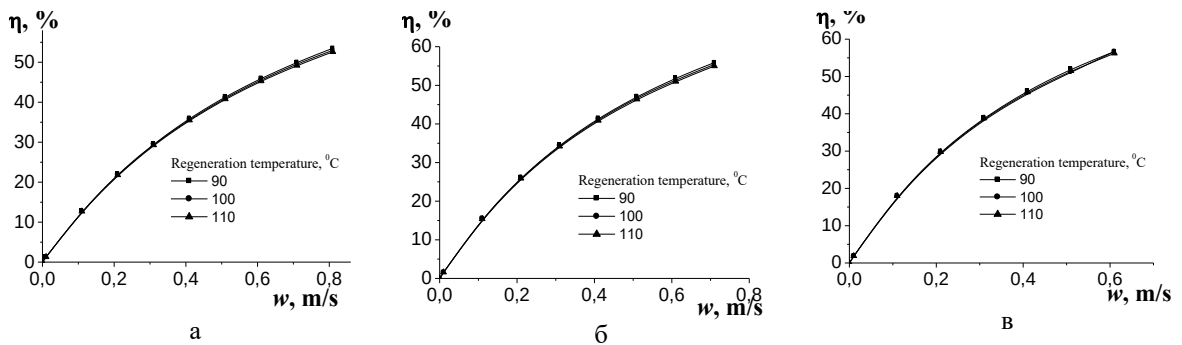


Fig 3. Efficiency coefficient-vs-air flow rate. Relative humidity degree: 40 (a), 50 (b) and 60 % (c).

Heat storage device tests was carried out in premise with floor area during period from 1 of November 2014 to 28 of February 2015. Tested device was used for load-factoring in power systems instead of fan heater and oil heater, their energy consumption being 1.5 – 2.5 kW. The initial temperature in premise was 12°C. Vapor-air flow rate was set at 0.25 m/s . Heat storage device was filled with 10 kg of sorbent ‘silica gel – sodium sulphate’. Mineral wool (thickness 100 mm, thermal conductivity coefficient 0.035 $\text{W} \cdot \text{m/K}$) was used as warmth-keeping material.

Accumulating device was tested in two modes. In the first half-term it was switched on for load-factoring of electric energy in the morning, indoor temperature being kept within limits from 20 °C to 22°C during day hours. During the second half-term heat storage device was switched on for load-factoring of evening peak of electric energy, indoor temperature being kept within limits from 20 °C to 22°C during night hours up to next morning. Average temperature plots for both test modes are given on Fig. 4. Two peaks according to discharging and charging of heat energy device are observed on both curves, they being registered as the first and second after accumulator start. Peak sorbent temperature when discharged is almost 60°C, it being resulted from sorbent cooling with air-in flow.

Hotter temperature when charged is corresponded with composite sorbent regeneration temperature. When composite regenerated during day hours, heat for its warming and regeneration carried by solar collector, in night

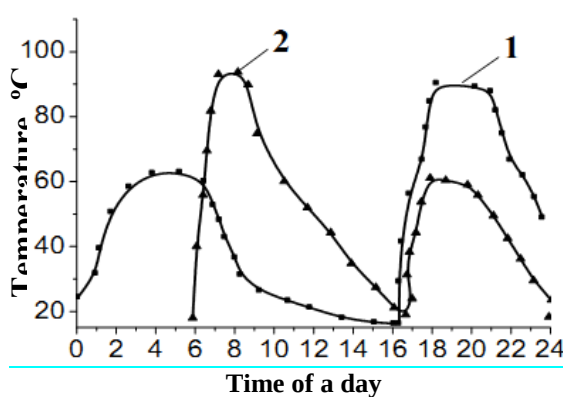


Fig. 4. Averaged temperature sorbent curves when heat storage device started in the morning (1) and in the evening (2).

hours this being carried by resistance element. Efficiency factors calculated with ratio of two peaks ratio are almost 32 % for both operating modes, it being correlated with calculated values 33 % for the same conditions.

To ascertain advisability of sorptive heat storage device for space heating energy consumption of solid fuel combustion boiler, gas-fired combustion boiler and electric boiler were compared when heat demand equaled to 339.5 MJ per day for floor area 100 m². Indexes min and max correspond to energy consumption at solar and cloudy weather respectively. Results are given in the Table.

When open-type sorptive heat accumulator applied, energy consumption in heat supply system was decreased in minimum of 3.5 times versus gas-fired combustion boiler. As compared to solid fuel combustion boiler and electric boiler, energy consumption was reduced no less than 2.9 and 2.4 times. When heat for sorbent regeneration carried

by solar collector, energy consumption was lessened about 90, 76 and 61 times versus gas-fired combustion boiler, solid fuel combustion boiler and electric boiler, respectively.

Table. Energy consumption when sorptive open-type heat energy storage device used for space warming (floor area is 100 m²)

Heat source	Solid fuel combustion boiler PROTECHN TT	Gas-fired combustion boiler PROSKURIV AOGV-16 B	Electric boiler Dnipro-mini 12kW, 380 V	Heat energy storage device _{min}	Heat energy storage device _{max}
Capital input, Thous. UAH	7	7	5	6	6
Energy consumption, kg of standard fuel per day	22	26	17.69	0.29	7.5

Conclusions

Operating processes of open-type sorptive heat storage device were studied. Algorithm for calculation efficiency coefficients of this device is developed. It involves computation of mass transfer coefficient, sorption, useful heat sorption, heat input for heating of sorbent, device casing, water in the humidifier, evaporation of water, heating the sorbed water, desorption, and efficiency coefficient.

Optimal technological parameters of exploiting processes of open-type heat storage device based on composite sorbent 'silica gel – sodium sulphate' are estimated by suggested algorithm. They are stated to be vapor-air mixture speed 0.6 – 0.8 m/s and relative humidity of 40 - 60%, efficiency coefficient being ranged from 53 to 57 %.

Power consumption decreasing in 2,4 - 90 times versus decentralized heating systems from solid fuel, gas and electric boilers is stated when open-type sorptive heat storage device used. Its operating economy is stated for decentralized heat supply systems. Application perspectiveness of open-type heat storage device is shown for heat supply systems.

References (according to APA)

1. Malyarenko, V. A., Nechmogolod, I. E. (2011). Neravnomernost grafika zagruzki energosistemy I sposoby eyo byravnivaniya. Svitlotehnika ta elektroenergetika, 4, 61 – 66.
2. Kchronusov, G. S. (1998). Formirovanie effektivnykh regomov electropotrebleniya promyshlennykh predriyatiy. P. 1. Ekaterinburg, 340.
3. Bragin, A. A. (2013) Algorithm formirovaniya grafikov electriceskikh nagruzok s primeneniym accumulyatornykh batarey v kachestve poterbiteley-regulyatorov motshnosti. PhD thesis. SPb, 130
4. Edem, K., Tsoukpoe, N., Liu H., Le Pierres, N., Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2385 – 2396.

5. Bertsch, F., Dagmar, J., Asenbeck, S., Kerskes, H., Druecka, H., Wagner, W., Weiss, W. (2014). Comparison of the thermal performance of a solar heating system with open and closed solid sorption storage. Energy Procedia, Vol. 48, 280 – 289.
6. Okada, K., Nakanome, M., Kameshima, Y. [et al.]. (2010). Water vapor adsorption of CaCl₂/impregnated activated carbon. Mater. Res. Bull, 45, 1549 – 1553.
7. Gordeeva, L. G. Glaznev, I. S., Savchenko, E. V. [et al.]. (2006). Impact of phase composition on water adsorption on inorganic hybrids – salt/silica. J. Colloid Interface Sci., 301, 685 – 691.
8. Xin, L., Huiling, L., Siqi, H. [et al.]. (2010). Dynamics and isotherms of water vapor sorption on mesoporous silica gels modified by different salts. Kin Catal., 2010, 51, 754 – 761.
9. Lukin, V. D., Nocolskiy A. V. (1989). Tsyklytcheskiye adsorbtsionniye protsessy: Teoriya i raschet. L.: Khimia, 256.
10. Sukhyy, K. M., E.A. Belyanovskaya, E. A., Kozlov, Ya. N., E. V. Kolomiyets, E. V., Sukhyy, M. P. (2014). Applied Thermal Engineering, 64, 408 – 412.
11. Pavlov, K. F. (1987). Prymeri i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskoy tekhnologiyi. L.: Khimia, 1987, 576.
12. Matveykin, V. G., Poginin, V. A., Putin, S. B. Skvortsov, S. A. (2007). Matematicheskoye modelirovaniye i upravleniye processom korotkotsyklovoy beznagrevnoy adsorbtsiyi. M.: Mashinostroyeniye-1, 140.

УДК 622.278

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО ТОПЛИВА ИЗ УГЛЯ ПАРОПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

Холявченко Л.Т., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Опарин С.А. *, канд. техн. наук, доцент, Давыдов С.Л.,
Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,
Днепр, Украина
*ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,
Днепр, Украина

ECONOMIC PROSPECTS FOR PRODUCTION OF SYNTHETIC MOTOR FUEL FROM COAL GASIFICATION PIROPLASMOSIS

Holyavchenko L. T., Oparin S. A. *, Davydov S. L.
The Institute of geotechnical mechanics. N. With. Polyakov NAS of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
* Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

***Аннотация.** Одним из направлений энергетических ресурсов, альтернативных нефти, является переработка углеродсодержащих сред в жидкие моторные топлива. Разработанные технологии переработки углеродсодержащих сред в синтетические моторные топлива до настоящего времени были экономически неконкурентными с технологиями получения моторных топлив из нефти в связи с достаточно низкой стоимостью нефти и высокими капиталовложениями альтернативных технологий. Учитывая мировую тенденцию повышения стоимости нефти и возрастания требований к охране окружающей среды, альтернативные технологии становятся конкурентными. В этой связи повышается интерес к технологиям по получению синтетических моторных топлив из углеродсодержащих сред, имеющие более высокие экологические показатели. Это позволит частично отказаться от нефтяных источников и в значительной степени снизить выбросы в окружающую среду. В работе приведены значения капитальных и операционных затрат производства синтетического моторного топлива из угля путем пароплазменной газификации и осуществлен сравнительный анализ затрат разрабатываемой с существующими технологиями производства синтетического моторного топлива. Результаты проведенных расчетов позволили получить зависимости стоимости нефти, приведенной к нефтяному эквиваленту, от стоимости углеродсодержащей среды. Показано, что технология аллотермической пароплазменной газификации углеродсодержащих сред конкурентоспособна на современном рынке производства синтетических моторных топлив среди его производителей передовых мировых компаний и с*

увеличением стоимости исходной углеродсодержащей среды ее конкурентоспособность будет только увеличиваться.

Abstract: One of the areas of energy resources alternative to oil, is the processing of carbon-containing environments in a liquid motor fuel. Developed technology for converting carbon-containing environments in synthetic motor fuels to date have been economically uncompetitive technologies for producing motor fuels from oil due to the rather low cost of oil and high capital investments for alternative technology. Given the global trend of increasing oil prices and increasing requirements for environmental protection, alternative technologies become competitive. In this regard, increasing interest in the technologies for obtaining synthetic fuels from carbonaceous environments with higher environmental performance. This will partially abandon its oil sources and greatly reduce emissions into the environment. The paper presents the values of capital and operating costs of production of synthetic motor fuels from coal by gasification and piroplasmosis a comparative analysis of costs developed from existing technologies of production of synthetic motor fuel. The results of the conducted calculations allowed to obtain based on the price of oil provided to the oil equivalent of the cost of carbon-containing environment. It is shown that technology piroplasmosis allothermic gasification of carbonaceous environments competitive in the modern market of production of synthetic motor fuels among his producers of the world's leading companies and with the increase in the value of the original carbonaceous environment, its competitiveness will increase.

Ключевые слова: уголь, синтетическое моторное топливо, газификация, экономическая оценка

Keywords: coal, synthetic fuels, gasification, economic evaluation

Постановка проблеми. Значительную долю в топливно-энергетическом балансе стран занимает нефть, занимающая лидирующие позиции в мировом энергетическом балансе. По прогнозам некоторых экспертов увеличение темпов потребления нефти приведет к снижению мировых ее запасов, что в значительной степени отразится на повышении ее стоимости и, в свою очередь, приведет к увеличению стоимости продуктов переработки нефти, в частности жидкого топлива.

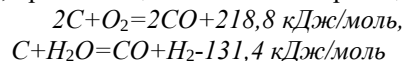
В данной сложившейся ситуации поиск энергетических ресурсов, альтернативных нефти, является актуальной задачей.

Одним из таких направлений является переработка углеродсодержащих сред в жидкие моторные топлива. Разработанные технологии переработки углеродсодержащих сред в синтетические моторные топлива до настоящего времени были экономически неконкурентными с технологиями получения моторных топлив из нефти в связи с достаточно низкой стоимостью нефти и высокими капиталовложениями альтернативных технологий. Учитывая мировую тенденцию повышения стоимости нефти и возрастания требований к охране окружающей среды, альтернативные технологии становятся конкурентными. В этой связи повышается интерес к технологиям по получению синтетических моторных топлив из углеродсодержащих сред, имеющие более высокие экологические показатели. Это позволит частично отказаться от нефтяных энергоисточников и в значительной степени снизить выбросы в окружающую среду.

Цель статьи. Одним из углеродсодержащих источников, альтернативных нефти, является уголь, запасы которого в Украине достигают 34 млрд. т. Многими исследователями показана перспективность получения синтетического моторного топлива из угля. Поэтому задачей исследований, представленных в работе, является определение оценки экономической эффективности производства синтетического моторного топлива из угля.

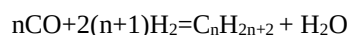
Основная часть. Технологию получения синтетического моторного топлива (СМТ) можно разделить на три стадии.

Первая стадия – получение синтез-газа в современных аллотермических процессах с применением энергии низкотемпературной плазмы, протекающих по основным реакциям:



В совмещенном термохимическом процессе деструкцией воды на водород и кислород получаем кислород для окисления углерода, и дополнительно водород, повышающий калорийность газовой фазы до 11,5-12 МДж/м³ и его объемный выход на 40-45%. Генерируемый газ на 98-99% состоит из синтез-газа (CO+H₂), а соотношение его компонентов находится в пределах 1-0,5, что определяет качество углеводородного комплекса в технологии дельнейшего синтеза жидких углеводородов.

Вторая стадия – осуществление процесса Фишера-Тропша, в котором происходит синтез жидких углеводородов на базе генерируемого синтез-газа. В упрощенном виде этот процесс можно представить в виде следующей химической реакции:



Состав конечных продуктов этой технологии зависит от катализаторов, температуры, давления, соотношения CO/H₂ в рабочей смеси газовой фазы, ее чистоты. Выход продуктов синтеза включает легкие фракции, дизтопливо, сжиженные газы (до 70%), нефтя и парафины (30%). Нефтя не содержит серы и ароматических углеводородов и используется как нефтехимическое сырье.

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Третья стадия – облагораживание полученных продуктов после второй стадии, которая заключается в доведении конечного продукта до нужного качества. Стадия хорошо освоена в современной нефтепереработке.

Учитывая вышеизложенное, цену СМТ, получаемого из угля путем его пароплазменной газификации ($C_{смт(у)}$), можно определить по формуле:

$$C_{смт(у)} = C_1 + C_2 + C_3,$$

где C_1 – стоимость первой стадии производства СМТ (производство синтез-газа), дол./барр.;

C_2 – стоимость второй стадии, дол./барр.;

C_3 – стоимость третьей стадии, дол./барр.

Рассматривая составляющие формулы по определению цены СМТ, получены значения капитальных и операционных затрат производства СМТ (без стоимости исходного сырья и его переработки). Результаты расчетов приведены в таблице 1. Данные расчеты, с определенной степенью достоверности, характеризуют трудоемкость и капиталоемкость сравниваемых технологий. В сумме общих затрат производства СМТ передовых компаний, эти затраты могут достигать 60% и распределяются они между отдельными стадиями следующим образом: получение кислорода 35%, генерация синтез-газа 25% [1].

Значительные затраты по этим стадиям, особенно по капитальным вложениям, существенно сдерживают развитие технологии СМТ. В то же время расчеты показывают, что капиталоемкость пароплазменной технологии по первой стадии производства, не превышает 3-4% от общих по всем стадиям. Сравнение этих показателей свидетельствует о низкой капиталоемкости пароплазменной технологии в главной стадии производства СМТ, чем выгодно отличает ее от технологий передовых мировых компаний.

Таблица 1. Оценка стоимости капитальных и операционных затрат производства СМТ по сравниваемым технологиям (без стоимости исходного сырья).

№ пп.	Компания (технологический процесс)	Углеродсодерж. среда, технологич. КПД	Затраты производства СМТ (без стоимости сырья)						
			производство синтез-газа I стадия, дол./барр.		Общие затраты по трем стадиям, дол./барр.			Всего (Σ затраты)	
			Капиталь- ные, Зк(I)	Операци- онные, Зо(I)	Капиталь- ные, Зк	Операци- онные, Зо	% кап. затрат в общих затратах, I стадия	дол./ барр.	дол./т
1	SASOL (автотерм.)	Природ. газ, 0,55	7,5	2,9	18,5	16,3	21,55	34,8	273,8
2	BP/Mobile (автотерм.)	Природ. газ, 0,65	5,1	3,9	13,2	16,9	16,94	30,1	240,0
3	Syntroleum (автотерм.)	Природ. газ, 0,62	1,8	4,4	5,4	13,1	9,68	18,6	151,1
4	DOE ceramic membrane (автотерм.)	Природ. газ, 0,5	6,2	0,8	14,7	13,8	21,75	28,5	225,1
5	Пароплазма (аллотермич.), Цэ = 0,9 грн/кВт·ч	Уголь, 1,0	0,77	0,36	8,97	13,36	3,45	22,33	169,5

На основании вышеизложенного и результатов расчетов получены зависимости эквивалентной стоимости СМТ, приведенной к нефтяному эквиваленту, от стоимости углеродсодержащей среды и установлены зоны экономической эффективности производства СМТ различными технологиями.

В большей части стоимость производства СМТ зависит от стоимости исходного сырья, методов и средств его термических превращений, энергоемкости этого процесса. Из рис. 1 видно, что при ценах на природный газ до 200 дол./1000 м³ и на уголь до 1000 грн/т производство СМТ пароплазменной технологией практически остается конкурентным с технологиями передовых мировых компаний.

При повышении цен на сырье, например, в 3 раза, стоимость производства СМТ пароплазменным способом на 8-10% будет ниже показателей сравниваемых компаний. С дальнейшим увеличением цен на углеродсодержащее сырье эта разница показателей будет только увеличиваться, что хорошо подтверждается углом наклона зависимостей $C_{смт} = f(C_{сырья})$ (рис.1). Большой угол наклона зависимостей передовых компаний объясняется тем, что с подорожанием исходного сырья, все большая часть его стоимости

переносится в реакционные автотермические процессы, тогда как аллотермическая пароплазменная технология мало зависит от этого показателя и больше зависит от цены энергии вносимой из вне, а конкурентность ее в этом случае будет только расти.

Перспектива применения и конкурентность технологий производства СМТ из природного газа, в том числе и пароплазменной из угля, наглядно прослеживается зависимостью эквивалентной цены на нефть от стоимости исходного сырья и технологий производства (рис.2). Исследованиями установлены зоны экономической эффективности применения известных мировых технологий, в том числе и пароплазменной, для синтеза жидких углеводородов в виде СМТ (альтернатива производства моторного топлива из сырой нефти).

Исследования показывают, что любая из известных технологий может быть эффективной при цене на сырую нефть не менее 40-45 дол/барр. Дальнейшее повышение этих цен только увеличивает эффективность производства СМТ любой из известных технологий, в том числе и пароплазменной. Сравнительный их анализ показывает, что аллотермический пароплазменный способ производства СМТ конкурентоспособен даже на уровне сравнительно низких, реально существующих цен на исходное сырье (рис.2). В диапазоне цен на уголь 1000-1500 грн/т и электроэнергии 0,7-1,3 грн/кВт·ч при стоимости сырой нефти 45-50 дол/барр пароплазменная технология остается конкурентной на рынке СМТ среди передовых мировых компаний. Только компания Syntroleum имеет сравнимые показатели при цене на природный газ от 100 до 200 дол/м³. Дальнейший рост цен на исходное сырье резко ограничивает зону экономической эффективности производства СМТ базовых компаний (рис.2). Разрабатываемая технология менее чувствительна к этому показателю, что неизбежно улучшает перспективы ее реализации.

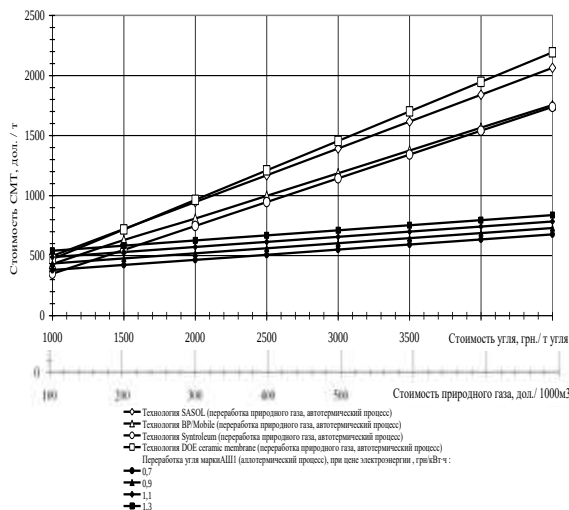


Рис. 1. Стоимость СМТ в зависимости от стоимости углеродсодержащей среды.

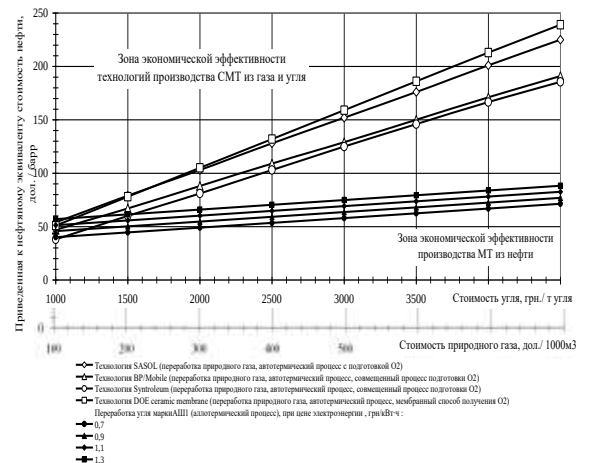


Рис. 2. Стоимость нефти, приведенная к нефтяному эквиваленту, в зависимости от стоимости углеродсодержащей среды.

Выводы:

1. Показано, что технология аллотермической пароплазменной газификации углеродсодержащих сред конкурентоспособна на современном рынке производства синтетических моторных топлив среди его производителей передовых мировых компаний (Sell, Syntroleum, SASOL и др..) и с увеличением стоимости исходной углеродсодержащей среды ее конкурентоспособность будет только увеличиваться.

2. Положительный экономический баланс всех известных технологий, в том числе и пароплазменной, в производстве СМТ, как альтернативы моторному топливу из сырой нефти, в значительной степени зависит от цены на эту нефть. Он может быть достигнут при цене на нефть не ниже 45-50 дол/барр или других объективных обстоятельств. Дальнейший рост этой цены только увеличивает перспективу экономической составляющей альтернативных технологий.

3. Установлено, что стоимость единицы массы СМТ из угля производимого по технологии пароплазменного реформинга практически уравнивается с ценой СМТ, производимого из природного газа передовыми мировыми компаниями, при росте цены на газ от 100 до 200 дол/1000м³. Дальнейший рост цен на газ только увеличивает положительный баланс пароплазменной технологии.

Литература

1. Ю.В. Синяк, А.Ю. Колпаков Эффективность производства синтетических моторных топлив / Журнал Проблемы прогнозирования // Выпуск № 1. - 2012.
2. Химическая энциклопедия / Фишера-Тропша синтез. - т.5. - 1998г

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОТОПЛЕНИЯ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Селихов Ю.А., канд. техн. наук., профессор, Коцаренко В.А., канд. техн. наук.,
профессор, Давыдов В.А., аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический
институт», г. Харьков

HEAT POWER HEATING SYSTEM OF HOT WATER SUPPLY AND HEATING ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Selikhov Yu.A., Cand. Tech. Sciences, professor, Kotsarenko VA, Cand. Tech. Scientist,
professor, Davydov VA, post-graduate student

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv

Аннотация: Предложена теплоэнергетическая система снабжения: электроэнергией, горячей водой и отоплением, в которой совместно с ветроэлектростанцией, двухконтурной солнечной установкой, используется геотермальный грунтовый тепловой насос «грунт-вода», аккумуляторы электроэнергии и теплоты. Эта система позволяет: уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет снижения материалоемкости и расходов на оборудование, которое используется; экономить органическое топливо; производить электроэнергию и излишек ее отдавать в государственную электросеть; уменьшить тепловую нагрузку и загрязнение окружающей среды. Система разработана, изготовлена и установлена на одном частном подворье в Харьковской области после реконструкции коттеджа. Работа теплоэнергетической системы управляется и контролируется в автоматическом режиме с автоматизированного рабочего места. Двухконтурная солнечная установка обеспечивает горячее водоснабжение коттеджа. Тепловой насос обеспечивает отопление в холодное время года и кондиционирование в теплое время года. Ветроэлектростанция вырабатывает электроэнергию для работы электрооборудования коттеджа, а излишки электроэнергии направляются в электроаккумуляторы либо в государственную электросеть. Тепловое аккумулирование осуществляют баки-аккумуляторы.

Abstract: The reserves of fossil fuels, which are a traditional source of energy, are not unlimited. This leads to the need to seek new, and preferably unconventional and renewable sources of energy. In all likelihood, the combination of several energy sources - solar, wind energy and a geothermal heat pump as the most "clean" from an ecological point of view, than the energy sources of traditional energy will prove to be most useful. It should be noted that the experience accumulated by different countries in the use of solar collectors and heat pumps, as well as wind generators, demonstrates the high possibilities of simply transforming these types of energy into thermal energy and electricity, which can be successfully used for supply: electricity, hot water, hot air, heating in Premises of public and private households, as well as providing various kinds of technological and domestic needs not only in different industries, but also in Including at enterprises of the agro-industrial complex of Ukraine. In Ukraine, the installation of solar heat and cold supply, heat pumps and wind generators at civil and industrial construction sites has not yet been widely implemented, which is associated with relatively low prices for traditional energy sources and insufficient market preparedness compared to other countries, and it is constrained by high metal content And the cost of solar collectors and heat pumps, and not the preparedness of our market for the production of wind power generators. Therefore, in our opinion, the concept of creating such new heat and power systems, in which renewable sources of energy will be used as energy sources, is topical. For such heat-and-power systems, new designs for solar installations, heat pumps and wind generators will be constructed, when the cost of generating heat and electricity through these facilities will be lower than the total cost of generating heat and electricity by traditional methods (in particular, in boiler plants). Simultaneously, the payback period of such heat and power systems should be commensurate with the warranty period of their operation. This can be achieved through the use of cheap domestic materials, the release of which is guaranteed in sufficient quantities for a long period in Ukraine. Therefore, the use of non-traditional and renewable energy sources, the saving of organic fuel, which is necessary for heating the coolant from 8 to 95 ° C, the improvement of the ecological situation in the region of consumption of thermal energy by reducing the emissions of pollutants, which include the combustion products of traditional types of energy, Fuel, which is used for the production of thermal energy in boiler equipment, electricity generation by means of wind generators is an act al tasks. Before reconstruction in the heating system of the cottage, a boiler with a black oil burner was used. The cost of fuel oil with delivery and pumping into a container at the location and use

all year round is about one hundred thousand hryvnia per year. Further, the fuel oil is supplied to the boiler by gravity. However, the ignition of fuel oil in the boiler is carried out at a temperature of 90 ° C. Therefore, the fuel oil must be heated before being fed into the boiler. Burning of fuel oil in the boiler leads to emissions of harmful substances into the atmosphere, and the number of heating batteries in the house increases the metal capacity of the heating installation. It was decided to replace the boiler with a fuel oil burner with a heat-and-power system: providing private home ownership with hot water using a two-circuit solar water heating system, heating with a geothermal ground-water heat pump, and installing a wind generator to generate electricity for the whole electrical equipment of the cottage. For this purpose, a new technological scheme was developed for the heat-energy system of hot water supply and heating of the cottage. In ground heat pumps, heat energy is used, which is stored in the soil by heating it with the sun or other sources. Soil has the ability to store solar heat for a long time, which leads to a relatively uniform level of heat source temperature throughout the year, and this ensures the operation of a heat pump with a high conversion factor. The wind power generator generates electricity for the operation of the electrical equipment of the cottage, and surplus electricity is sent to the electric accumulators or to the state power grid. The operation of the heat power plant is controlled and monitored automatically from an automated workstation. In the case of an increase in the outdoor temperature to the uncomfortable mark, the solar installation is switched off and the conditioning mode is activated in the heat pump. A heat-and-power supply system is proposed: electric power, hot water and heating, in which a geothermal ground-water heat pump, electric power and heat accumulators are used in conjunction with a wind-electric generator, a two-circuit solar installation. This system allows: to reduce the cost of thermal energy by reducing the material consumption and the cost of equipment that is used; To save organic fuel; Produce electricity and surplus it into the state power grid; Reduce heat load and environmental pollution. The system is designed, manufactured and installed on one private farmstead in the Kharkov region after the reconstruction of the cottage. The operation of the heat-and-power system is controlled and controlled automatically in an automated workplace. Two-circuit solar installation provides hot water supply to the cottage. The heat pump provides heating in the cold season and air conditioning in the warm season. If the water temperature is lower than the automatic one, the water is supplied from the storage tank to the second circuit of the condenser and cooler of the geothermal groundwater heat pump "soil-water", heated to the required temperature and delivered to the consumer. The wind power generator generates electricity for the operation of the electrical equipment of the cottage, and surplus electricity is sent to the electric accumulators or to the state power grid. Thermal accumulation is carried out by accumulator tanks.

Ключевые слова: ветроэлектрогенератор, солнечная установка, тепловой насос, возобновляемые источники энергии.

Key words: wind generator, solar installation, heat pump, renewable energy sources.

Постановка проблемы. В конце 70-х г.г. стало ясно, что запасы ископаемого топлива, которое относится к традиционному источнику энергии, не беспредельны. Это приводит к необходимости изыскивать новые, и предпочтительно нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. По всей вероятности, наиболее полезным окажется сочетание нескольких источников энергии – солнечной, энергии ветра и геотермального теплового насоса как наиболее «чистых» с экологической точки зрения, чем источники энергии традиционной энергетики [1].

Отметим, что опыт, накопленный разными странами в использовании солнечных коллекторов и тепловых насосов, а также ветроэлектрогенераторов демонстрирует высокие возможности простого превращения этих видов энергии в тепловую энергию и электроэнергию, которые могут успешно использоваться для снабжения: электроэнергией, горячей водой, горячим воздухом, отоплением в помещениях государственных и частных домовладений, а также обеспечению разного рода технологических и бытовых потребностей не только в разных отраслях промышленности, но и в том числе на предприятиях агропромышленного комплекса Украины [2, 3].

Анализ последних исследований и публикаций. В Украине установки солнечного тепло- и холодоснабжения, тепловые насосы и ветроэлектрогенераторы на объектах гражданского и промышленного строительства пока не получили широкого внедрения, что связано с относительно низкими по сравнению с другими странами ценами на традиционные энергоносители и недостаточной подготовленностью рынка, а также оно сдерживается высокой металлоемкостью и себестоимостью солнечных коллекторов и тепловых насосов, и не подготовленностью нашего рынка к выпуску ветроэлектрогенераторов.

Поэтому, на наш взгляд, актуальной является концепция создания таких новых теплоэнергетических систем, в которых в качестве источников энергии будут использованы возобновляемые источники энергии. Для таких теплоэнергетических систем будут сконструированы новые конструкции солнечных установок, тепловых насосов и ветроэлектрогенераторов, когда расходы на выработку тепловой энергии и электроэнергии с помощью этих установок будут ниже уровня суммарных расходов на получение тепловой энергии и электроэнергии традиционными способами (в частности, в котельных установках). Одновременно с этим срок окупаемости таких теплоэнергетических систем должен быть соизмерим с гарантийным сроком их эксплуатации. Это может достигаться за счет использования дешевых отечественных материалов, выпуск которых гарантирован в достаточных объемах в течение длительного срока в Украине. Поэтому

использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, экономия органического топлива, которое нужно для нагревания теплоносителя с 8 до 95 °С, улучшение экологической ситуации района потребления тепловой энергии за счет снижения объемов выбросов загрязняющих веществ, к которым относятся продукты сгорания традиционных видов энергии, - органического топлива, которое используется для производства тепловой энергии в котельном оборудовании, производство электроэнергии с помощью ветроэлектрогенераторов являются актуальными задачами.

Цель статьи. В данной работе авторами предлагается теплоэнергетическая система снабжения: электроэнергией, горячей водой и отоплением, которая была смонтирована на одном частном дворе в Харьковской области при реконструкции коттеджа.

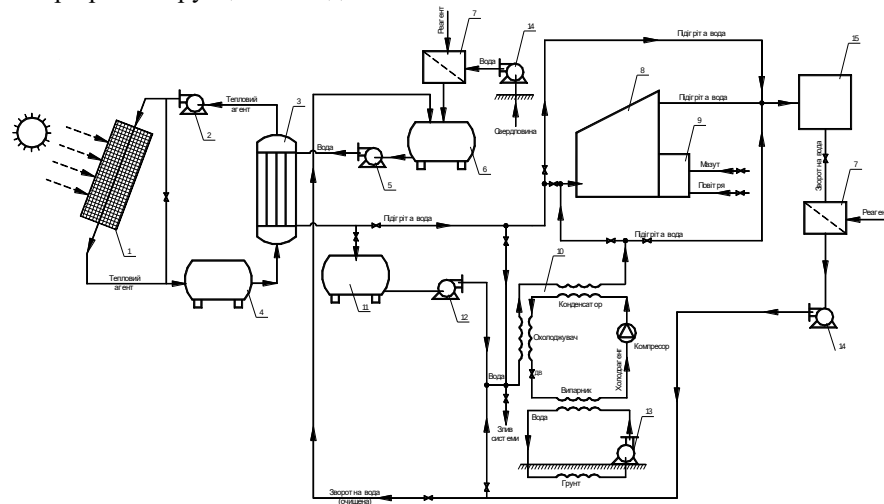


Рис. 1. Технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа
1 - Гелиоколлектор; 2 - Насос; 3 - Теплообменное устройство;
4, 6, 11 - Баки-аккумуляторы; 5 - Насос; 7 - Установки химводоочистки;
8 - Котельная установка; 9 - Топка котла; 10 - Грунтовой тепловой насос; 12 - Насос;
13 - Насос; 14 - Насосы; 15 - Пользователь

Ранее в системе отопления коттеджа применялся котел с мазутной горелкой. Стоимость мазута с доставкой и перекачкой в емкость по месту расположения и использования круглый год составляет порядка ста тысяч гривен за год. Далее, подача мазута в котел осуществляется самотеком. Однако, возгорание мазута в котле осуществляется при температуре 90 °С. Поэтому, мазут необходимо подогреть до подачи в котел. Сгорание мазута в котле приводит к выбросам в атмосферу вредных веществ, а количество батарей отопления в доме к увеличению металлоемкости установки отопления. Нами было принято решение о замене котла с мазутной горелкой на теплоэнергетическую систему: обеспечивающую частное домовладение горячей водой с помощью двухконтурной солнечной водонагревательной установки [4], отопление с помощью геотермального грунтового теплового насоса «грунт-вода» [5] и установке ветроэлектрогенератора для выработки электроэнергии для работы всего электрооборудования коттеджа.

Нами была разработана новая технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа. Работа новой технологической схемы, которая представлена на рис. 1, следующая.

Новая теплоэнергетическая установка может работать как сезонно, так и целый год.

Принцип действия установки при сезонной работе в теплое время года. Антифриз (тепловой агент) из бака-аккумулятора 4 через первый контур теплообменника 3 циркуляционным насосом 2 подается в гелиоколлектор 1 солнечной установки, где нагревается до необходимой температуры и назад поступает в бак-аккумулятор 4. Нагретый антифриз отдает свое тепло во втором контуре теплообменника 3 теплоносителю (вода), который подается циркуляционным насосом 5 из бака-аккумулятора 6, и подогретая поступает в бак-аккумулятор 11. Вода из скважины насосом 14 подается в установку химводоочистки 7, где очищается от многих солей и дальше поступает в бак-аккумулятор 6. Подогретая до необходимой температуры вода во втором контуре теплообменника 3 подается пользователю 15 на горячее водоснабжение. Когда температура воды не удовлетворяет пользователя 15, вода из бака-аккумулятора 11 циркуляционным насосом 12 подается во второй контур охладителя и конденсатора грунтового теплового насоса 10 «грунт-вода», где догревается до необходимой температуры и поступает пользователю 15.

Обратная вода от пользователя 15 подается в установку химводоочистки 7, где очищается, и циркуляционным насосом 14 подается в бак-аккумулятор 6, или, в случае недостаточного количества воды пользователю 15, подается во второй контур охладителя и конденсатора грунтового теплового насосу 10, где догревается, и опять поступает пользователю 15. В случае аварийной ситуации есть возможность выпустить теплоноситель в канализацию (слив воды из системы). В случае повышения температуры воздуха на улице до некомфортной отметки, отключается солнечная установка и включается в тепловом насосе режим кондиционирования. Вода из грунтового теплообменного коллектора циркуляционным насосом 13 подается в контур теплых полов, охлаждает площадь пола и воздуха в комнатах коттеджа до комфортной температуры.

Принцип действия установки для круглогодичной работы. В теплое время года принцип работы установки показан выше. А в холодное время года установка работает так. Вода с температурой $5\div 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплообменного коллектора грунтового теплового насоса циркуляционным насосом 13 подается во второй контур испарителя теплового насоса, где нагревает холодоагент первого контура, который превращается в пар. Пар холодоагента поступает в компрессор, где сжимается до высокой температуры и давления. Далее пар поступает в конденсатор теплового насоса, где отдает свое тепло второму контуру конденсатора [20], в который подается вода циркуляционным насосом 12 из бака-аккумулятора 11, или циркуляционным насосом 14 от пользователя 15. Таким образом, вода нагревается сначала во втором контуре конденсатора, а затем во втором контуре охладителя и поступает к пользователю с необходимой температурой (максимальная $80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Когда из строя выходит: солнечная установка и тепловой насос, то в качестве теплового дублера выступает котельная установка 8 с мазутной горелкой 9, которая подогревает воду до необходимой температуры и подает ее в систему отопления, и в систему горячего водоснабжения коттеджа. В случае аварийной ситуации есть возможность выпустить теплоноситель в канализацию (слив воды из системы). В грунтовых тепловых насосах используется тепловая энергия, которая накоплена в почве за счет нагревания ее солнцем или другими источниками. Почва имеет свойство хранить солнечное тепло в течение длительного времени, которое ведет к относительно равномерному уровню температуры источника тепла в течение всего года, и это обеспечивает эксплуатацию теплового насоса с высоким коэффициентом преобразования. Ветроэлектрогенератор на рис. 1 не показан. Ветроэлектрогенератор вырабатывает электроэнергию для работы электрооборудования коттеджа, а излишки электроэнергии направляются в государственную электросеть. Работа теплотехнической установки управляется и контролируется в автоматическом режиме с автоматизированного рабочего места.

Таким образом, тепловая энергия теплотехнической системы снабжения Q_T состоит из тепловой энергии двухконтурной гелиоустановки Q_1 и тепловой энергии теплового насоса Q_2 , и рассчитывается по уравнению

$$Q_T = Q_1 + Q_2. \quad (1)$$

Значения количества использованной теплоты для предыдущего подогрева воды определяется по формуле

$$Q_1 = G_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (2)$$

где G_B – массовый расход подогреваемой воды, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_B – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 c_B – теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$; t_B' , t_B'' – температура холодной и подогретой воды, соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Значения количества теплоты в тепловом насосе определяется по формуле

$$Q_2 = \xi \cdot N_{\text{цн}}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент преобразования теплового насоса; $N_{\text{цн}}$ – энергия, потраченная для реализации цикла теплового насоса.

Экономия топлива ΔB в котлоагрегате за счет использования такой системы можно рассчитать с помощью уравнений теплового баланса (1-3).

Годовая экономия условного топлива составит, т.у.т./год

$$\Delta B_{\text{а.т.}} = \frac{Q_{\text{а.т.}}}{Q_H^p \cdot \eta_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $Q_H^p = 29,33$ МДж/кг - теплотворная способность условного топлива; $Q_{\text{аг а}}$ – годовое количество утилизируемой теплоты, МДж/год; $\eta_{\text{е}}$ – коэффициент полезного действия котла.

Экономия органического топлива определяется, т/год (тыс. м³/год)

$$\Delta B = \Delta B_{\text{аг а}} \cdot \frac{29,33}{1000 \cdot Q_H^p} \quad (5)$$

Годовая экономия за счет сокращения расхода первичного топлива для подогрева воды составит для котлоагрегата, грн/год

$$\dot{A}_{\text{г}} = \Delta B \cdot \ddot{O}_{\text{г}} \quad (6)$$

где $\ddot{O}_{\text{г}}$ – стоимость первичного топлива, грн/т (грн/1000 м³).

Срок окупаемости теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления составит, год

$$T = S_C / (Q_0 \cdot C_T) \quad (7)$$

где S_C – удельная стоимость теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления, грн/м²; Q_0 – годовое количество теплоты, выработанное теплоэнергетической системой, Гкал/м²; C_T – стоимость теплоты от традиционного энергоисточника, грн/Гкал.

Были проведены расчеты эффективности использования предложенной теплоэнергетической системы водоснабжения для котельной с водогреющими котлами типа КВГ тепловой мощностью 40 Гкал/год. При количестве утилизируемой теплоты 0,432 Гкал /сутки и времени работы 5760 час/год, годовая экономия топлива составляет 7200 м³ у.т./год. Срок окупаемости достигает 1,5 года.

Поскольку предложенная система была смонтирована на частном подворье в Харьковской области при реконструкции коттеджа и проработала полных четыре года, то экономия топлива составила сто тысяч гривен за год.

Выводы. Таким образом, применение теплоэнергетической системы снабжения: электроэнергией, горячей водой и отоплением, в которой совместно с ветроэлектростанцией, обеспечивающим электроэнергией все электрооборудование, двухконтурной солнечной установкой, обеспечивающей горячее водоснабжение, геотермального грунтового теплового насоса, обеспечивающего отопление и кондиционирование, аккумуляторов электроэнергии и теплоты позволяет: уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет снижения материалоемкости оборудования, которое используется; экономить органическое топливо; производить электроэнергию и излишек ее отдавать в электроаккумуляторы либо в государственную электросеть; уменьшить тепловую нагрузку и загрязнение окружающей среды.

Литература

1. Концепция государственной энергетической политики Украины на период до 2020 г. // Информационное приложение. – 2001. – № 10. – 8 с.
2. Овчаренко В.А. Овчаренко А.В. Використання теплових насосів // Холод М+Т, 2006, №2 с. 34–36.
3. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухкало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экотехнологии и ресурсосбережение. – Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004. – с. 70–75.
4. Селіхов Ю.А., Бухкало С.І., Селіхова Н.В., Селіхова Л.Ю. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.

ДИНАМІКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОГО МІСКАНТУСА

Атаманюк В.М. д.т.н, проф., Мосюк М.І., к.т.н., Гнатів З.Я., к.т.н,
Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів

FILTRATION DRYING DYNAMICS OF SHREDDED MISCANTHUS

Atamanyuk V.M. D.Sc, professor, Mosyuk M.I. Ph.D, Hnativ Z.Ya., Ph.D.
Lviv Polytechnic National University, Lwiw

Анотація: Енергії біомаси, за використанням, займає у світі провідне місце серед відновлювальних видів енергії. Вона може замінити близько 1 200 млн. тон умовного палива щорічно. Це становить близько 10% світового споживання первинних енергоресурсів і це робить її четвертим за вагомістю видом палива. У розвитку біоенергетики суттєвих успіхів досягнуто у Європейському Союзі. Найважливішу роль біомаса відіграє при виробництві теплової енергії. На сьогоднішній день з неї виробляється близько 15% загального обсягу теплової енергії в ЄС. Передбачається що у 2020 році у країнах ЄС з відновлюваних джерел буде вироблятися близько 18% теплової енергії від загального обсягу виробництва. З них близько 75% - з біомаси, а решта - з геотермальної енергії та сонячної енергії.

В Україні тверда біомаса утворюється при виробництві та переробці продукції рослинництва: солома зернових, лушпиння, качани кукурудзи, відходи деревообробної промисловості та виробництва паперу. Також до твердого біопалива також можна віднести рослинний матеріал, що спеціально вирощується в енергетичних цілях, наприклад, плантації міскантусу або енергетичної верби.

У цій статті представлено результати експериментальних досліджень динаміки фільтраційного сушіння подрібненого міскантусу. Наведено основні технічні характеристики (насипна густина, пористість, еквівалентний діаметр) подрібненого міскантусу. Показана залежність швидкості сушіння подрібненого міскантусу залежно від її вологості та проаналізовано залежність фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента і висоти шару матеріалу. Показано що швидкість фільтраційного сушіння в період повного насичення теплового агента парами води не залежить від висоти шару подрібненого міскантусу.

Abstract: In the world of the renewable biomass energy is a leader in use. About 1 200 mln. tons of equivalent fuel annually replaces from biomass. It 10% of the global primary energy consumption and is the fourth largest fuel. Significant progress in bioenergy reached in the European Union. The most important role played by the biomass in heat production sector. At the moment of it produced about 15% of the heat energy in the EU. By European Commission forecast 2020 EU the renewable produce about 18% of the total heat output. Of these, about 75% - from biomass and the rest - with geothermal energy and solar energy.

In Ukraine, a large of solid biomass produced in the production and processing plant production, cereal straw, husks, cobs, waste wood industry and paper manufacturing. By solid biofuels also include plant material specially grown in energy purposes, such as miscanthus or plantations energy willow.

The results of experimental researches of dynamics of the filtration drying of ground up miscanthus are presented. Basic technical descriptions (bulk closeness, porosity, equivalent diameter) over of ground up miscanthus are brought. Shown dependence of speed of drying of ground up miscanthus depending on her humidity and dependence of the lauter drying is analysed on technological parameters thermal to the agent and heights of layer of material. It is shown that speed of the lauter drying in the period of complete satiation of thermal agent does not depend the pairs of moisture on the height of layer of ground up miscanthus.

Ключові слова: динаміка, міскантус, швидкість фільтраційного сушіння, стаціонарний шар.

Keywords: dynamics, miscanthus, speed of the lauter drying, stationary

Постановка проблеми. У зменшенні енергетичної залежності України важливе значення має розвиток і використання на біопаливо відновлюваних джерел енергії, зокрема рослинної біомаси [1]. В останні десятиліття, зростання попиту на відновлювальні джерела енергетики стало причиною підвищеного інтересу до енергетичних рослин. Україні належить великий потенціал біомаси, доступної для енергетичного використання, вона має добрі передумови для розширення використання на паливо [1].

Сьогодні за обсягами виробництва біомаса як паливо займає четверте місце в світі. Її частка в загальному виробництві первинної енергії досягає 10 % [20.pdf]. Багаторічні трави для виробництва біопалива мають значні переваги у порівнянні із традиційними : високу продуктивність біомаси, позитивний

енергетичний баланс, невибагливість до ґрунту, посухостійкість. Отже ці рослини можна вирощувати на малопродуктивних землях, які мало придатні для вирощування продовольчих культур [2]. Авторами [1] встановлено що найпродуктивнішими поміж багаторічних культур виявились міскантус гігантський, сильфій пронизанолистий, гірчаки Вейріха та сахалінський, сіда багаторічна, топінамбур, а також соняшник однорічний. Найменш продуктивними виявились лофант анісовий і гісоп лікарський, які є ефіро4олійними культурами. Зокрема міскантус гігантський забезпечує одержання 12,0 т/га сухої маси, 210 ГДж/га та 7,2 т/га умовного палива. В Україні протягом останніх років міскантус (*Miscanthus giganteus*) вирощують з метою вивчення можливості промислового його використання для виробництва біопалива[2]. Відомо, йбільш рентабельний і енергоефективний в природних умовах України міскантус, який має безліч застосувань: в першу чергу як альтернативне джерело енергії(біопалива), а також в якості будівельного матеріалу, для тваринництва, в якості постільного приладдя, корма для тварин і тому подібне.

Енергетичний аналіз головних стадій виробництва біопалива дозволяє виділити основні ділянки, що впливають на енергоефективність виробництва та собівартість продукції. При виробництві біопалива найбільш енергоємним є процес теплового сушіння. Близько 90 % теплової енергії витрачається на випаровування вологи. В середньому на цей процес витрачається 12-20 % цільового продукту біопалива, що виробляється на підприємстві. [3].

Аналіз останніх публікацій:

Біомаса на сьогодні є четвертим за значенням паливом у світі, що дає близько 1250 млн тонн у.п. на рік, що становить приблизно 15 % усіх первинних енергоносіїв, а в деяких країнах цей показник перевищує 30 %. Згідно з програмою «Енергетична стратегія України на період до 2030 р. і подальша перспектива» передбачено частку біомаси в 2020 р. в системі паливної енергетики 7,8 % (6,3 млн. тонн у.п.) [4].

Твердопаливна біосировина, як об'єкт для сушіння, має складну природну структуру, зумовлену її первинним походженням, фізичним станом тощо. Тому потрібно враховувати ці фактори в процесі конвективного сушіння – найбільш використовуваного для обробки біомаси (в основному до 70 %), в барабанних та конвеєрних сушильних установках [4].

Авторами [4] встановлено що більш ефективним (на 18-26 %) і більш якісним є спосіб повернення (рециркуляції) частини відпрацьованого тепла. В сушарці з рециркуляцією кількість циркулюючого повітря збільшується у 1,3-1,9 рази.

У [5] досліджено процес сушіння біопалива із соломи. Встановлено що при отриманні брикетів із соломи підвищеної вологості доцільно їх досушувати в два етапи. На першому етапі – сушка паливних брикетів проводиться атмосферним повітрям, на другому – повітря після першого етапу підігрівається калорифером, що забезпечує більш ефективну сушку.

У статті [6] було досліджено кінетику сушіння стружки як сировини для виробництва паливних брикетів. Одержані оптимальні температури сушіння матеріалу з різним фракційним складом, залежності кінцевої вологи сировини від часу сушіння та вплив фракційного складу на процес сушіння. Встановлено характеристики сушильного обладнання, яке є оптимальним для технології виготовлення паливних брикетів.

Мета досліджень. Теоретичне та експериментальне дослідження динаміки фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса.

Об'єктом дослідження виступав подрібнений міскантус. Який являє собою багаторічну кореневищну траву яку застосовують для отримання твердих біопалив.

Методика дослідження. Для оцінки основних параметрів шару досліджуваного матеріалу основні технічні характеристики подрібненого міскантуса представлено у табл. 1.

Таблиця 1.

Основні технічні характеристики подрібненого міскантуса Будь ласка, наберіть символи з картинок текстом

$\rho_{\text{нас.}}, \text{КГ/М}^3$	$\rho_{\text{эф.}}, \text{КГ/М}^3$	$\varepsilon_{\text{ш}}, \text{М}^3/\text{М}^3$	$d_e \cdot 10^3, \text{М}$	$a, \text{М}^2/\text{М}^3$
122,23	562	73,75	4,18	705

Насипну густину $\rho_{\text{нас.}}$ подрібненого міскантуса визначено за стандартною методикою згідно з ГОСТ 10840, загальну пористість досліджуваних матеріалів ($\varepsilon_{\text{ш}}$) – пікнометричним методом. Еквівалентний діаметр каналів (d_e), крізь які фільтрується тепловий агент, визначено із залежності:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{ш}}}{a} \quad (1)$$

де a – питома поверхня шару подрібненого міскантуса, яку визначено приладом ПМЦ – 500 за методикою [7].

Кінетика сушіння описує зміну вологості матеріалу в часі залежно від властивостей висушувачого матеріалу та визначає час сушіння й енергетичні затрати. Тому експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса проведено за методикою, описаною в роботі [7-8].

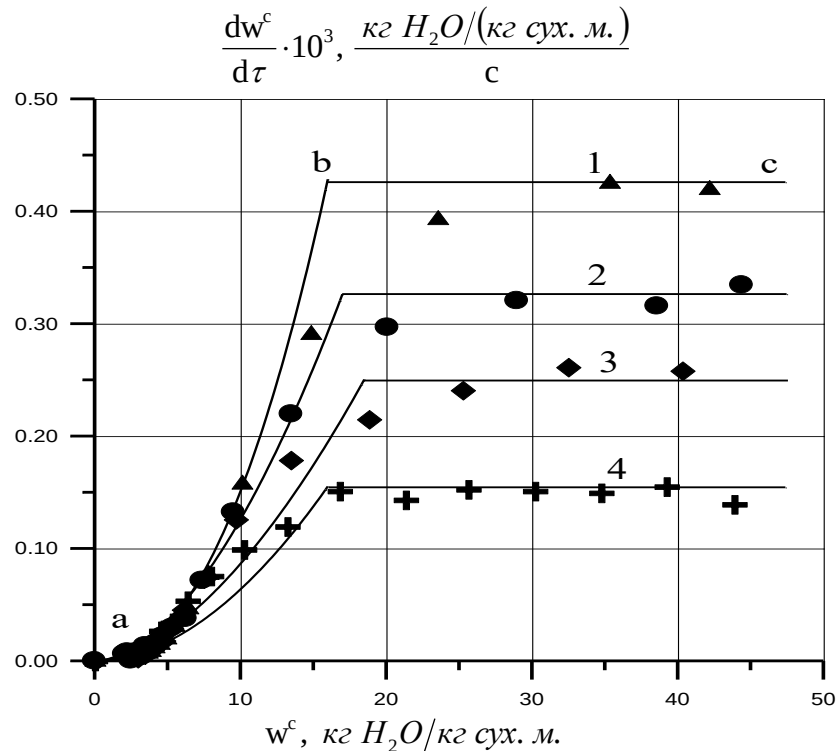


Рис 1. Швидкість фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса за різної швидкості фільтрування теплового агента

($H = 60 \text{ мм}$, $t = 60^\circ \text{C}$) 1 – $\omega = 0,68 \text{ м/с}$; 2 – $\omega = 1,14 \text{ м/с}$; 3 – $\omega = 1,6 \text{ м/с}$; 4 – $\omega = 2,05 \text{ м/с}$.

Експериментальна частина роботи.

На рис. 1 показана залежність швидкості сушіння подрібненого міскантуса залежно від її вологості. Точка *b* відповідає завершенню періоду повного насичення теплового агента парами води, тобто досягнення фронту масообміну перфорованої перегородки і переходу процесу фільтраційного сушіння до періоду часткового насичення теплового агента. Внаслідок того, що швидкість фільтрування теплового агента змінюється від $\omega_0 = 0,68 \text{ м/с}$ до $\omega_0 = 2,05 \text{ м/с}$, швидкість сушіння також зростає від

$$\frac{dw^c}{d\tau} = 0,002 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кг } H_2O/(\text{кг сух. м.})}{\text{с}} \quad \text{до} \quad \frac{dw^c}{d\tau} = 0,0047 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кг } H_2O/(\text{кг сух. м.})}{\text{с}}, \quad \text{що}$$

пояснюється зростанням коефіцієнтів тепло- й масоперенесення.

Сказане стосується і рис. 2 у випадку, коли зростає температура теплового агента і, як наслідок, зростає сушильний потенціал теплового агента, що приводить до росту швидкості сушіння.

Аналіз рис. 2 показує, що швидкість сушіння зростає із зменшенням висоти шару, це пояснюється тим, що зміну вологовмісту шару визначали ваговим методом в розрахунку на масу сухого матеріалу.

$$\frac{dw^c}{d\tau} \cdot 10^3, \frac{\text{кг } H_2O/(\text{кг сух. м.})}{\text{с}}$$

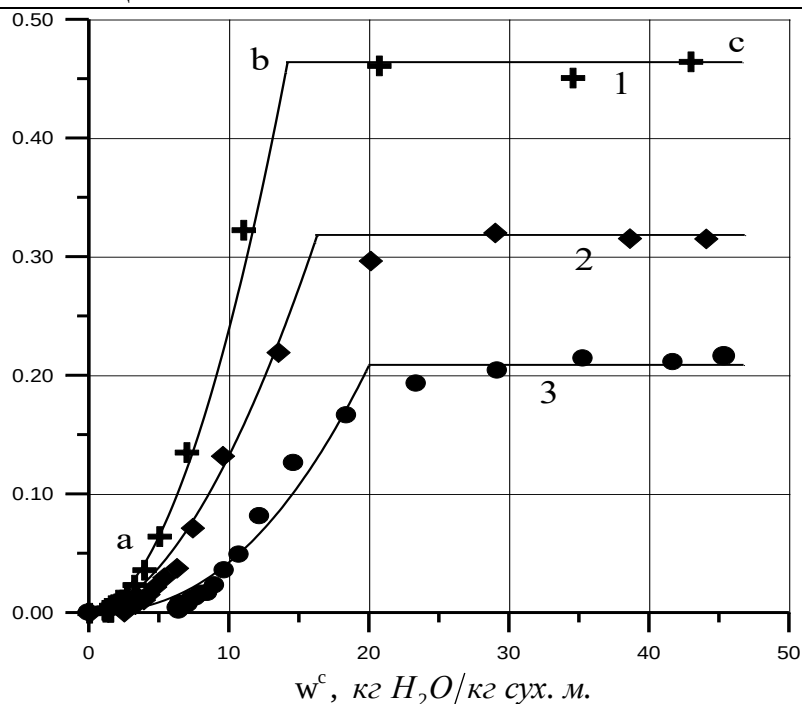


Рис 2. Швидкість фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса за різної температури теплового агенту ($H = 60 \text{ мм}$, $\omega_0 = 1,6 \text{ м/с}$), 1 – $t = 40 \text{ °C}$; 2 – $t = 60 \text{ °C}$; 3 – $t = 80 \text{ °C}$.

Зрозуміло, що з ростом висоти, зростає кількість води в шарі і маса сухого матеріалу, тому на рис. 3 швидкість сушіння в період повного насичення теплового агента є найбільшою для найменшої висоти шару.

$$\frac{dw^c}{d\tau} \cdot 10^3, \frac{\text{кг } H_2O/(\text{кг сух. м.})}{\text{с}}$$

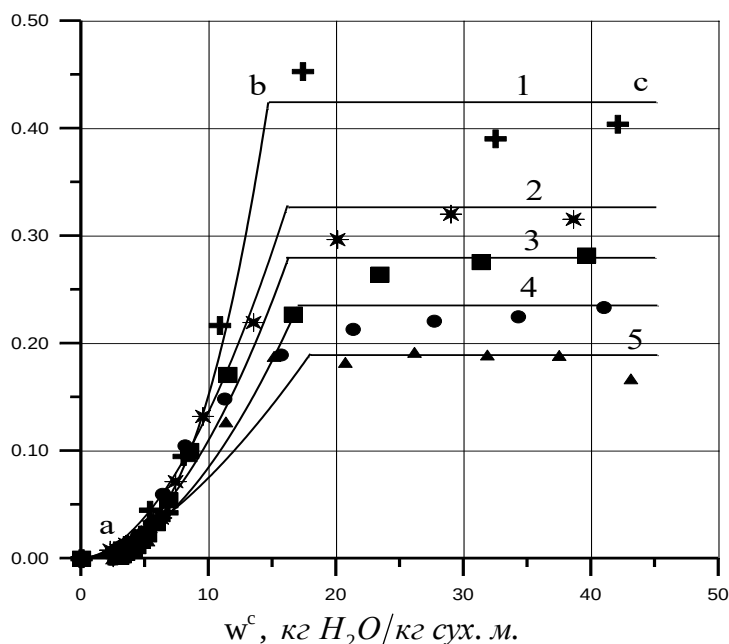


Рис 3. Швидкість фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса за різної висоти шару

$$(\omega_0 = 1,6 \text{ м/с}, t = 60^\circ \text{C}).$$

Однак, як доказано вище (рис. 2), швидкість сушіння в період повного насичення теплового агента парами вологи не залежить від висоти шару, що пояснюється стабільністю сушильного потенціалу за однакової температури і швидкості фільтрування теплового агента (кількість вологи, що видаляється в одиницю часу, є постійною величиною).

Висновки. Досліджено динаміку фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса під час фільтраційного сушіння. Обґрунтовано існування двох етапів фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса. Проаналізовано залежність фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента (сушильного потенціалу) і висоти шару матеріалу.

Доказано, що швидкість фільтраційного сушіння не залежить від висоти шару матеріалу.

Література

1. V. Kurhak, N. Yefremova, Yu. Leshchenko and A. Tkachenko, "Enerhetychna tsinnist' bahatorichnykh TRAV"yanykh fitotsenoziv", Zbirnyk naukovykh prats' NNTs "Instytut zemlerobstva NAAN", vol. 2, pp. 164-173, 2015.
2. T. Stefanov'ska, "Struktura entomokompleksu miskantusu hihant-s'koho miscanthus giganteus", Naukovi dopovidi Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy, vol. 33, no. 3, p. 6, 2012.
3. Yu. Snezhkin, D. Korinchuk, M. Bez'hin and I. Stepchuk, "Enerhetychnyy analiz tekhnolohiy vyrobnytstva tverdoho biopalyva", Odes'ka natsional'na akademiya kharchovykh tekhnolohiy, vol. 45, no. 3, pp. 187-190, 2014.
4. Методи та результати теоретичних досліджень сушіння сировини для твердих біопалив / В. Дубровін, О. Єременко, С. Виговський, М. Дахно // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. - 2013. - Вип. 17(2). - С. 255-266. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ttar_2013_17%282%29_35
5. Удосконалення процесу сушки паливних брикетів із соломи / Ю. І. Семірненко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів. - 2015. - Вип. 11. - С. 72-75. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2015_11_17
6. Исследование кинетики сушки опилок и стружки в интенсивном режиме / И. А. Тельнов [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные исследования в научных работах студентов. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2012. – № 10. – С. 139-144.
7. Атаманюк, В.М. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій [Текст] / В.М. Атаманюк, І.Р. Барна // Збірник наукових праць ОНАХТ. – Одеса. – 2012, – Т.2, Вип.41, – С. 89-93.
8. Мосюк, М.І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08. / М.І. Мосюк; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2012. – 22с.

УДК 640.43+662.921

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ

І.М.Ощипок, д-р техн. наук, професор

Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів, Україна

THE ASSESSMENT OF ENERGY PERFORMANCE AND EXPLUATATION OF HOTEL-RESTAURANT COMPLEXES

Oshchypok I.M.

Lviv trade and economic University, Lviv, Ukraine

Анотація: У статті виділені критерії оцінки обслуговування готелю, проведений їх детальний аналіз. Це дозволить отримувати оперативну інформацію про технічний стан інженерних мереж, виявляти факти не бережливого використання енергоресурсів, засвідчувати якісний сервіс для споживачів, допомагаючи оцінити якість обслуговування готельного об'єкту в цілому. Для цього розроблений алгоритм оцінки показників контрольно-виміральної системи готельно-ресторанних комплексів. Оцінка якості обслуговування готельним комплексом допоможе скоротити витрати шляхом прийняття ефективних управлінських рішень забезпечення енергозбереження і підвищення експлуатаційних показників роботи. Для виділення проблемних ділянок необхідно докладно розглянути окремо кожен групу критеріїв. У системі є як кількісні, так і якісні критерії. Для їхнього зіставлення використовується єдина шкала. Слід зазначити, що

питома вага цих методів істотно залежить від класу проблем в управлінні готелем і може бути вирішена експертним оцінюванням. Лише комплексний підхід з правильним вибором архітектурно-просторової композиції будівлі, прийомів формування об'ємно-планувального вирішення та синергетичне поєднання архітектурно-планувальних прийомів дозволять зменшити навантаження на інженерні системи будівлі і архітектурно-планувальні прийоми, сприятимуть збільшенню ККД енергоактивного обладнання дадуть можливість розробити вдало проектне рішення енергоефективності готельної споруди.

Abstract: The article highlights the criteria for assessing the maintenance of the hotel, carried out their detailed analysis. This to-will desire to get timely information about technical condition of engineering networks, to identify the facts not the careful use of energy resources, to certify quality service to consumers, helping to assess the service quality of the hotel facility in General. To do this, the algorithm estimates is indicators control and measurement systems of the hotel-restaurant complexes. The assessment of service quality of a hotel complex will help to reduce costs by adopting effective management solutions, providing energy savings and improving operational performance. For the forming of problem areas must be carefully considered separately each group of criteria. The system has both quantitative and qualitative criteria. For comparison using a single scale. It should be noted that the weight of these methods greatly depends on the class of problems in the management of the hotel and can be solved by expert estimation. Only a comprehensive approach with the right choice of the architectural-spatial composition of a building, methods of formation of space-planning decisions and the synergy of architectural and planning methods will reduce load on building systems and architectural design techniques that increase efficiency of energy active equipment will give the opportunity to successfully develop the project design energy efficiency of hotel facilities.

Ключові слова: готель, будівля, енергоефективність, обслуговування, критерій

Keywords: hotel, building, energy efficiency, maintenance, criteria

Постановка проблеми у загальному вигляді. Ефективна експлуатація готельно-ресторанних комплексів повинна забезпечуватись усіма роботами для створення якісних і сприятливих умов для проживання гостей. В даний час її знижують незрозумілі споживачам розцінки на послуги обслуговуючих організацій, низька температура теплоносія в обігрівальних приладах під час опалювального сезону тощо. З такими умовами часто зустрічаються мешканці готелів, туристичних баз і оздоровчо-відпочинкових закладів.

Досвід багатьох країн показує, що лише комплексна термомодернізація існуючого фонду готельно-ресторанних закладів здатна кардинально вплинути на скорочення споживання енергоресурсів. Модернізація будівлі, за підрахунками фахівців, може в остаточному підсумку забезпечити економію енергоресурсів близько 50 %. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) стверджує, що кожен долар, інвестований в енергоефективність, обернеться 4 дол. економії, причому такий проект повністю окупиться приблизно за чотири роки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що в Україні проблемами формоутворення з метою підвищення енергоефективності житла були присвячені роботи Сергійчука О.В., Кащенко Т.О., Шулдан Л.О., в яких досліджувалося підвищення енергоефективності житлових будинків на основі оптимізації їх форми, геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків, розвиток методик кількісного оцінювання енергоефективності архітектурних рішень. За результатами досліджень встановили, що проект енергоефективного будинку – результат рішення багатьох задач різного змісту: функціональних, інженерних, конструктивних, економічних, художніх тощо, які найбільше відповідають меті мінімізації витрат енергії на забезпечення комфортного мікроклімату. За формою будівель найбільш поширеними є прямокутні паралелепіпеди з основою квадрат, прямокутник.

Не даний час не досліджувались питання енергоефективності готельно-ресторанних комплексів без яких не обходиться туристична галузь. Скорочення енергозатратності, підвищення комфортабельності номерів дає значний ефект при експлуатації і має серйозні резерви для удосконалення.

В даний час змінюється ставлення до проблем заощадження ресурсів, витрат на виробництво, поставку енергоресурсів, що впливає на вартість послуг для проживаючих. З метою зменшення вартості послуг готелі оснащуються приладами обліку витрат енергоресурсів, води, споживаного тепла. За допомогою контрольно-вимірювальних приладів з'являється можливість повністю контролювати їх обсяг і розподіл.

Мета статті. Оцінити рівень експлуатаційного обслуговування і енергозабезпечення об'єктів готельно-ресторанних комплексів, проаналізувати критерії відповідності поставлених ресурсів. Сформулювати оцінку показників контрольно-вимірювальної системи готелю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нами були виділені критерії оцінки, проведений їх детальний аналіз рис. При цьому враховувалося, що джерелом будуть служити не тільки технічні показники роботи, а й система вимог споживачів до постачальників (виробників).



Рис. Критерії ефективної експлуатації готельно-ресторанного комплексу

Якість обслуговування готелю характеризується наступними критеріями: критерії якості поставлених ресурсів, критерії якості обслуговування номерним фондом,

$$KK_{\text{гд}} = \langle K_r, K_u, K_{\text{пр}} \rangle,$$

де $KK_{\text{гд}}$ - система критеріїв, які оцінюють стан обслуговування готелю;

K_r – критерії відповідності поставлених ресурсів;

K_u – критерії відповідності обслуговування готельним фондом;

$K_{\text{пр}}$ – критерії відповідності підрядних робіт

Для оцінки відповідності поставлених ресурсів інженерній групі необхідно надати всі покази приладів обліку ресурсів, що поставляються табл., а також журнал заявок, акти відповідності тощо.

$$K_r = \langle KV, KT, KG, KE, KVO \rangle.$$

Див. табл.

Підрозділи готелю, оснащені приладами обліку, об'єднуються в систему обліку витрат ресурсів, що дозволяє визначити технічно обґрунтовані обсяги їх споживання. Облік і регулювання споживання ресурсів дозволяє скоротити витрати на етапі експлуатації. Для введення режимного регулювання споживання води, газу, тепла встановлюються програмовані регулятори, які, наприклад, автоматично знижують температуру в приміщеннях, а отже, і витрату теплоносія за програмою: день/ніч, вихідний. За рахунок

Таблиця – Критерії стану обслуговування готелю

Ресурси, які поставляються	Критерії якості ресурсів, які поставляються	Показники якості забезпечення готелю	Позначення
1	2	3	4
Питтєва вода	Безперебійне цілорічне водопостачання. До 24 годин при аварії, до 8 годин на місяць відключення водопостачання. Відповідність санітарним нормам і	Кількість аварійних ситуацій та їх ліквідації за період часу визначають безперебійністю водопостачання, допустимим	KV

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

	правилам складу води. Відхилення від норми неприпустимі. Тиск холодного водопостачання в точці розбору: від 0,03 до 0,6 МПа.	вмістом домішок, який відповідає санітарним нормам і правилам, тиск у точці розбору: від 0,03 до 0,6 МПа	
Тепло	Безперебійне цілорічне гаряче водопостачання. До 24 годин при аварії, до 8 годин на місяць відключення водопостачання і до 4 годин одноразово. Безперебійна подача тепла на опалювальні прилади в опалювальний період. Відключення тепла допустимо до 24 годин на місяць і до 16 годин одноразово. Відповідність санітарним нормам і правилам складу води. Відхилення від норми неприпустимі. Тиск гарячого водопостачання в точці розбору: від 0,03 до 0,45 МПа. Тиск від внутрішньобудинкової системи опалювання не більше 1 МПа. Забезпечення температури повітря в приміщенні не нижче +18 °С в номерах. Забезпечення температури води в точці розбору не менше 50 і не більше 75 °С	Кількість аварійних ситуацій та їх ліквідації за період часу визначають. Безперебійністю тепlopостачання; допустимий вміст домішок відповідає заданим санітарним нормам і правилам, тиск гарячого водопостачання в точці розбору: від 0,03 до 0,45 МПа, тиск від внутрішньобудинкової системи опалення: не більше 1 МПа, температура повітря в приміщенні не нижче +18 °С в номерах, температура води в точці розбору не менше 50 і не більше 75 °С.	КТ
Газопостачання	Безперебійне цілорічне газопостачання. До 24 годин при аварії, до 8 годин на місяць відключення водопостачання. Відповідність параметрів і тиску газу стандартам і вимогам. Відхилення від норми неприпустимі. Тиск газу в мережі: від 0,0012 до 0,003 МПа. максимально допустиме відхилення мережевого газу 0,0005 МПа	Кількість аварійних ситуацій та їх ліквідації за період часу визначають безперебійність газопостачання, допустимий вміст домішок відповідає заданим санітарним нормам і правилам, тиск газу в мережі: від 0,0012 до 0,003 МПа. Максимально допустиме відхилення мережевого газу 0,0005 МПа	KG
Електропостачання	Безперебійне цілорічне електропостачання. До 24 годин відключення електропостачання. Відповідність напруги і частоти стандартам і вимогам. Відхилення від норми неприпустимі	Кількість аварійних ситуацій та їх ліквідації за період часу визначають безперебійністю електропостачання, відповідність напруги і частоти стандартам і вимогам	KE
Водовідведення	Безперебійне цілорічне водовідведення. До 8 годин при аварії, до 4 годин на місяць відключення водовідведення	Кількість аварійних ситуацій і їх ліквідація за період часу визначають безперебійність водовідведення	KVO

регулювання показників контролерів, регуляторів витрат, давачів і записуються в журнал. В результаті інженерна група має великий обсяг матеріалу, за якими вона повинна дати висновок щодо відповідності всім вимогам. Маючи у своєму розпорядженні необхідну документацію, інженерна група обстежує сам об'єкт, будівлю готелю і прилеглу територію. Особливу увагу інженерної групи звертають на технічні характеристики обладнання, інженерні мережі. Обробка даних включає в себе такі процеси:

- введення даних в систему;
- перевірка правильності введення;
- коригування даних;
- обробка даних згідно закладеного алгоритму.

Алгоритм оцінки показників контрольно-вимірювальної системи комплексу складається з наступних кроків:

1. Підготовка первинних даних. Збір даних про стан будинку готелю.
2. Визначення вагомості критеріїв.

Збір даних передбачає:

- проведення опитування;
- роботу з журналами заявок.

3. Нормування критеріїв.

Нормування критеріїв відповідності. Критерії повинні також перебувати в інтервалі від 0 до 1 або від 1 до нескінченності. Нормування можна виконати з використанням максимального або мінімального з значень критеріїв або суми значень критеріїв.

4. Представлення інформації за нормованими критеріями. Програма при введенні даних здійснює такі дії:

- виконується контроль над обов'язковим обсягом відомостей;
- проводить автоматичну перевірку на правильність заповнення полів;
- виконує формально-логічний контроль цілісності і несуперечності даних.

5. Згортка критеріїв у інтегральний показник.

6. Підготовка звіту.

Процес підготовки звітів включає в себе такі процеси:

- підготовка звіту;
- коригування;
- ввід даних;
- створення звіту.

Параметри послідовності дії експертизи:

$$EXP = \langle s, s_{ex}, VEX, OS, G \rangle,$$

де s – вихідна множина допустимих оцінок (МДО) якості обслуговування готелем;

s_{ex} – МДО відповідності обслуговування готельним комплексом для експертів;

VEX – взаємодія між експертами;

OS – зворотний зв'язок;

G – відображення $s_{nex} \rightarrow s$ або обробка.

1. Визначення МДО. На першому етапі визначимо підмножину множини $D = \bigcup_{k=1}^n D_k$, в якому шукається оцінка системи.

2. Визначення найбільш точної оцінки.

На другому етапі відбувається вибірка з МДО за принципом, найбільш точно відображає властивості системи оцінки обслуговування готельним комплексом. Це дозволяє представити задачу оцінювання кортежем

$$\langle s, PRO \rangle,$$

де s – МДО;

PRO – принцип оптимальності, який відображає властивість найбільш точної оцінки і задається функцією вибору,

$$FT_{PRO} = \begin{cases} v, & v \in JK \leq s \\ \emptyset, & v \notin JK \leq s \end{cases}$$

де v – оцінка системи моніторингу якості обслуговування готелем, яка є вирішенням задачі $\langle s, PRO \rangle$.

Розв'язок задачі оцінювання зводиться до вирішення двох завдань вибору:

– $\langle D, PROD \rangle$,

– $\langle s, PRO \rangle$

де $PROD$ – принцип оптимальності, що задає допустимість оцінки якості обслуговування готелем;

PRO – принцип оптимальності, що задає допустимість оцінки якості обслуговування готелем з s .

Рішенням завдань вибору є:

– $s = FT_{PROD}(D)$,

– $v = FT_{PRO}(s)$.

Визначимо розв'язок задачі вибору $\langle s, PRO \rangle$ як отримання результату оцінювання якості обслуговування готелем і опишемо його формулою

$$v = FT_{PRO}(s).$$

В якості s_k виступає безліч оцінок якості обслуговування готелем

$$D = O_{\infty k=1} D_k.$$

3. На третьому етапі експерт вибирає свою оцінку якості обслуговування готелем:

$$v_j = FT_j(s_{ex}) \in s_{ex} (j = 1, n).$$

На даному етапі експерти взаємодіють між собою.

4. Четвертий етап передбачає вирішення вихідної задачі оцінювання якості обслуговування готелем, де знаходиться результуюча оцінка з s .

5. П'ятий етап може вважатися останнім, якщо отримане рішення задовольняє всім умовам. В іншому випадку за допомогою зворотного зв'язку експертам передається додаткова інформація, і вони знову вирішують відповідні завдання вибору. Ресурси, які поставляються оцінюються за показниками з приладів обліку споживаних ресурсів, які надходять в диспетчерський пункт і заносяться в журнал. При зверненні експерта дані оцінюються і заносяться в опитувальний лист. Проводиться згортка нормованих критеріїв, які зводяться в інтегральний показник. Разом з прийомами, що дозволяють сформулювати цілісне об'ємно-планувальне рішення енергоефективних готельних будівель необхідно виділити ряд характерних прийомів, що дозволяють вирішити задачу забезпечення енергоефективності у готельному будівництві. Ці прийоми можна поділити на дві основні групи:

Архітектурно-планувальні прийоми, що дозволяють зменшити навантаження на інженерні системи будівлі. Архітектурно-планувальні прийоми, що дозволяють збільшити ККД енергоактивного обладнання. Перша група прийомів забезпечує оптимальне використання будівлею умов зовнішнього середовища та дозволяє максимально заощаджувати ресурси та енергію за рахунок «пасивних» засобів енергозбереження та дозволяє вирішити такі завдання як забезпечення природної вентиляції, обігрів приміщення, зниження тепловитрат, природне освітлення, інсоляція, очищення повітря в приміщенні. До цієї групи прийомів відносяться: Збільшення природного освітлення за допомогою оптимізації форми плану; збільшення природного освітлення за допомогою ефективного функціонального зонування; Збільшення природного освітлення за допомогою зменшення північної сторони фасаду.

Прийоми, що належать до другої групи дозволяють покращити роботу енергоактивного обладнання за рахунок адаптації об'ємно-планувального рішення під вимоги роботи такого обладнання. Окремо необхідно виділити прийоми, що забезпечують роботу вітрогенераторів в структурі енергоефективних готельних будівель, сонячних колекторів, системи збору дощової води. Крім того вони дозволяють створити архітектурну виразність будівлі та підкреслити соціальну значущість забезпечення енергоефективності. Розташування вітрогенератора поряд з будівлею в структурі генерального плану. Прийоми розташування сонячних батарей: Розташування батарей на фасаді будівлі (в тому числі в якості елементів опорядкування); на даху будівлі; поряд, в структурі генерального плану будівлі; системи збору дощової води можна також розташовувати: на даху будівлі; в структурі фасаду будівлі.

Висновок. Оцінка якості обслуговування готельним комплексом допоможе скоротити витрати шляхом прийняття ефективних управлінських рішень забезпечення енергозбереження і підвищення експлуатаційних показників роботи. Для виділення проблемних ділянок необхідно докладно розглянути окремо кожен критерій. У системі є як кількісні, так і якісні критерії. Для їхнього зіставлення використовується єдина шкала. Слід зазначити, що питома вага цих методів істотно залежить від класу проблем в управлінні готелем і вирішуються експертним оцінюванням.

Лише комплексний підхід з правильним вибором архітектурно-просторової композиції будівлі, прийомів формування об'ємно-планувального рішення та синергетичне поєднання архітектурно-планувальних прийомів, що дозволяють зменшити навантаження на інженерні системи будівлі і архітектурно-планувальні прийоми, дозволяють збільшити ККД енергоактивного обладнання дадуть можливість розробити вдале проектне рішення енергоефективності готельної будівлі.

Література

1. Постанова Верховної Ради України №1826-III від 22.06.2000 року «Про підсумки парламентських слухань «Енергетична політика України»
2. Національний план дій з енергоефективності до 2020 року, [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://naer.gov.ua/forum/userfiles/files/draft_national_renewable_energy_action_plan_through_2020_uk.pdf
3. Постанова КМУ від 22 жовтня 2008 р. N 935 «Про організацію державного контролю за ефективним (раціональним) використанням паливно-енергетичних ресурсів»

4. Tall Buildings and Sustainability. Report / [Will Pank, Maunsell Ltd Herbert Girardet, Urban Futures Greg Cox, Oscar Faber Ltd].- London: Corporation of London, 2002 – 66 с. – (Economic Development Office Corporation of London)

УДК 536.24:620.92:624.13

ВИЛУЧЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОТИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРМОСИФОНІВ

Морозов Ю.П.¹ докт. техн.наук, Чаласєв Д.М.^{1,2} канд.техн.наук, Величко В.В.¹

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ

²Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

SELECTION OF GEOTHERMAL HEATING BY THERMOSPHIONS

Yu.P. Morozov¹, D.M. Chalaev^{1,2}, V.V. Velichko¹

¹Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Kyiv

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

Анотація: Одним з розповсюджених джерел теплової енергії є природна теплота ґрунту. Предметом дослідження статті є технології видобування геотермальної низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі. Розглянуто технології видобування теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою свердловинних теплообмінників і геотермальних теплових насосів. Пропонується використовувати отриману теплоту в теплонасосних системах децентралізованого теплопостачання об'єктів невеликої встановленої потужності (ферми, житлові будівлі, котеджі, офіси, готелі). Перспективною технологією видобування низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі є технологія з використанням глибинних геотермальних зондів на основі термосифонних теплових труб. Безнасосний метод вилучення низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою глибинних термосифонних зондів дозволяє істотно підвищити показник сезонної ефективності (SPF) геотермального теплового насоса. При застосуванні цієї технології немає потреби організовувати примусову циркуляцію робочого тіла, тому що перенос теплоти відбувається шляхом випаровування та конденсації робочого тіла в термосифонній тепловій трубі. Завдяки чому скорочується споживання електричної енергії та підвищується показник сезонної ефективності геотермального теплового насоса. Показані переваги геотермальних свердловинних теплообмінників на основі термосифонних теплових труб в економічному та екологічному аспектах. Розглянуті теплофізичні властивості екологічно безпечних робочих тіл, що використовуються в геотермальних термосифонах, і наведені результати випробовувань експериментального зразка. В якості робочого тіла для геотермального термосифона використовується двоокис вуглецю (R-744). В порівнянні з іншими холодильними агентами для двоокису вуглецю характерний вищий тиск насичення, за рахунок чого забезпечується кращі показники теплопередачі геотермального термосифона. Нами досліджена можливість використання гнучких гофрованих нержавіючих труб вітчизняного виробництва для виготовлення глибинних геотермальних термосифонних зондів. Запропонована перспективна конструкція свердловинного теплообмінника на базі гнучких труб з гвинтовою накаткою гофр. Стікання конденсату по гвинтовій канавці сприяє рівномірному розподілу плівки робочого агента по стінці труби, що забезпечує ефективну теплопередачу на всій довжині теплової труби. Робота виконується за фінансової підтримки НАН України в рамках дослідницької програми «Ресурс».

Abstract: One of the most common sources of thermal energy is the natural heat of the ground. The subject of the research is the technology of geothermal low potential heat extraction from the near-surface layer of the Earth. The technology of heat extraction from the near-surface layer of the Earth using borehole heat exchangers and geothermal heat pumps is considered. The extracted heat is proposed to use in heat pump systems for decentralized heating objects with small capacity (farms, residential buildings, cottages, offices, hotels). A non-pumping method of extracting the low-potential heat from the near-surface layer of the Earth using deep thermosyphon probes allows significantly increasing the Seasonal Performance Factor (SPF) of a geothermal heat pump. The use of deep geothermal probes based on thermosyphon heat tubes is an advanced technology of low-potential heat extraction from the near-surface layer of the Earth. There is no need to organize forced circulation of the working fluid because heat transfer occurs due to evaporation and condensation of the working fluid in thermosyphon heat tube. The SPF for geothermal heat pump increases due to reduced electricity power consumption. The advantages of geothermal borehole heat exchangers based on thermosyphon heat tubes according to economic and environmental aspects are shown. The properties of environmentally friendly thermal working fluids used in the geothermal thermosyphon are considered and the result of experimental sample tests is shown. The carbon dioxide (R-744) is

used as the working fluid for geothermal thermosyphon. The carbon dioxide has a higher saturation pressure and provides better heat transfer characteristics of the geothermal thermosyphon than the other refrigerants. The possibility of use flexible corrugated stainless steel tubes of domestic production for the manufacture of deep geothermal thermosyphon probes was investigated. A promising design of the borehole heat exchanger based on flexible helical corrugated tubes is proposed. The flow of condensate through the helical groove promotes a uniform distribution of the working agent film along the tube wall, which ensures efficient heat transfer along the whole length of the tube. The work is carried out for financial assistance of NAS of Ukraine *within the "Resource"* research program.

Ключові слова: геотермальна енергія, свердловинний теплообмінник, термосифонна теплова труба, тепловий насос, теплопостачання.

Keywords: geothermal energy, borehole heat exchanger, thermosyphon heat pipe, heat pump, heat supply.

Основна частина. Останнім часом значний розвиток отримало геотермальне теплопостачання з використанням теплових насосів. За даними Всесвітнього геотермального конгресу з 2010 по 2015 рік використання теплоти приповерхневих шарів Землі для роботи теплових насосів збільшилось з 49% до 55,3% від загального об'єму споживання геотермальної енергії [1, 2]. З метою стимулювання розвитку цього напрямку в Україні в 2016 році прийнята нова редакція закону «Про альтернативні джерела енергії» [3]. Законом визначено, що теплова енергія, яка виробляється тепловими насосами з аеротермальної, гідротермальної або геотермальної енергії, вважається виробленою з відновлюваних джерел енергії за умови, що річний об'єм виробництва теплової енергії таким тепловим насосом більший, ніж об'єм теплової енергії, яку витрачено на виробництво при споживанні ним електричної енергії.

Енергетичні показники теплонасосних систем, що працюють з використанням низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі, значно залежать від ефективності вилучення геотермального тепла. Завданням даного дослідження є вивчення можливості використання в якості свердловинних теплообмінників термосифонних теплових труб на базі гнучких гофрованих нержавіючих труб. На теперішній час, в зв'язку з великою вартістю теплових труб, така технологія вилучення геотермального тепла не має широкого використання, а залучення для цих цілей відносно недорогих гнучких нержавіючих труб дозволяє створити прості в виготовленні і зручні в монтажі теплові труби великої довжини.

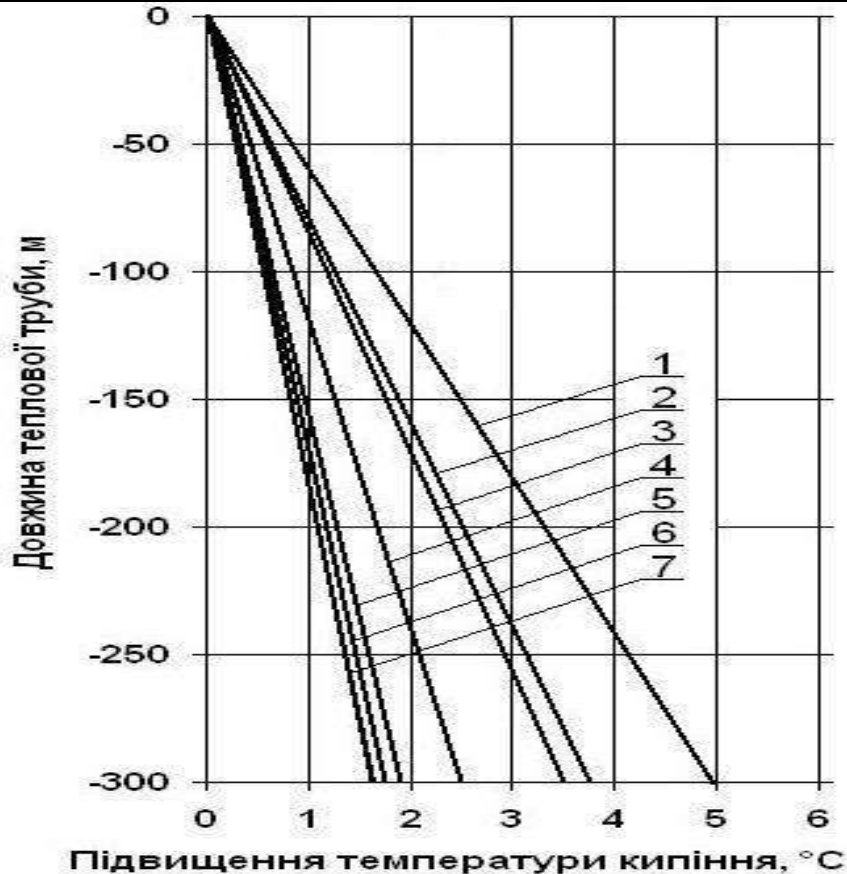
Приповерхневі шари Землі – це умовне поняття, і за літературними даними мають на увазі глибини до 400 м [4]. На цих глибинах може бути організовано вилучення теплоти гірських порід або підземних поверхневих вод за допомогою свердловинних теплообмінників. В Україні потенціал використання теплової енергії приповерхневих шарів Землі для теплопостачання об'єктів з використанням геотермальних теплових насосів оцінюється в 2 млн. т у.п. в рік [5-7]. Джерелом низькопотенційної теплоти на більшості об'єктів є тепло з геотермальних свердловин глибиною 30-50 м. Об'єкти теплоспоживання в більшості прикладів мають невелику встановлену потужність 18-27 кВт (котеджі, офісні центри, готелі), але відомі і теплонасосні системи потужністю в декілька сот кіловат [8].

При використанні енергії приповерхневих шарів Землі необхідно вирішувати і екологічні проблеми, тому що у випадку втрати герметичності свердловинних теплообмінників може трапитись забруднення ґрунтових вод, а при неякісному тампонуванні ствола свердловинного теплообмінника можуть змішуватися води з різних водоносних горизонтів.

Ефективним і екологічно безпечним альтернативним рішенням питання забруднення навколишнього середовища є використання геотермальних зондів на основі випарювально-конденсаційних термосифонів [9]. При порівнянні такого рішення з відомими системами на розсолах можна зазначити наступні переваги:

- кращі характеристики теплопередачі ґрунтового зонда;
- вища екологічна безпека (в якості низькокиплячого робочого тіла використовуються екологічно безпечні легкокиплячі агенти);
- більш високий показник сезонної ефективності (SPF-Seasonal Performance Factor).

Показник сезонної ефективності збільшується завдяки скороченню споживання електричної енергії за рахунок відсутності примусової циркуляції низькопотенційного теплоносія. Наприклад, в теплонасосній системі опалення індивідуального житлового будинку циркуляційний насос контуру низькопотенційного теплоносія споживає біля 200 Вт. Економія на електричному насосі дозволяє зменшити річне споживання електричної енергії на 360 кВт·год, і це збільшує показник SPF на 15-20% в порівнянні з насосною системою [10].



1 – R744; 2 – R134a; 3 – R22; 4 – R600a; 5 – R290; 6 – R1270; 7 – RC270.

Рис. 1. Вплив тиску стовпа газу в теплової трубі на температуру кипіння робочого тіла

В геотермальних термосифонних теплових трубах в якості робочого тіла перспективно використовувати теплоносії з високим тиском насичення та більшою густиною пари. З дозволених в теперішній час холодильних агентів з екологічної точки зору в першу чергу представляють інтерес так звані «природні» речовини – етан (R-170), пропан (R-290), циклопропан (RC-270), ізобутан (R-600a), двоокис вуглецю (R-744), пропилен (R-1270). За фізичними властивостями одним з найбільш відповідних робочих тіл для геотермальних термосифонів є двоокис вуглецю (R-744). В порівнянні з іншими холодильними агентами R-744 має значно більший тиск насичення [11, 12]. При температурі 0 °C густина пари R-744 в 7 разів вища, ніж у R134a, а величина об'ємної холодильної продуктивності складає 22500 кДж/м³ проти 2900 кДж/м³ для R134a. Однією з причин високої ефективності R-744 є також велика величина градієнта тиску насичення (1 бар/К), а також велика потужність охолодження, що приводить до невеликої масової витрати в термосифоні. Деяким недоліком є збільшення тиску насичення (і, відповідно, підвищення температури кипіння) вздовж вертикального термосифона за рахунок тиску стовпа газу (рис. 1). Однак, на експлуатаційні характеристики теплової труби це впливає незначно, тому що підвищення температури кипіння не перевищує 1,5 °C на 100 м глибини зонда.

Ефективність роботи теплової труби в значній мірі залежить від повноти змочування внутрішньої поверхні труби при стіканні рідкого агента. Режим стікання плівки конденсату залежить від конструкції теплової труби, довжини, шорсткості поверхні, а також режиму роботи теплового насоса. В теплових трубах невеликої довжини для забезпечення рівномірного змочування стінки звичайно встановлюють пористий гніт (фітіль), однак для геотермальних зондів, довжиною до 200 м, це рішення не може бути застосовано. Використання ж звичайних жорстких сталевих труб також є відносно складним і дорогим, тому що в цьому випадку теплова труба повинна збиратися на місці експлуатації з декількох окремих труб з проведенням відповідного контролю герметичності з'єднань.

В теплових трубах великої довжини ефективним рішенням є використання гнучких труб з гофрованою поверхнею. Готовий геотермальний зонд необхідної довжини доставляється в згорнутому вигляді на місце монтажу та безпосередньо з обмотки вводиться в канал стовпа.

Зараз в Україні налагоджено промислове виробництво подібних гофрованих нержавіючих труб з кільцевою та гвинтовою накаткою гофри [13]. Нами досліджено можливість використання таких труб для виготовлення трубчастих теплообмінників [14] та глибинних геотермальних термосифонних зондів. Випробовування експериментального зразка термосифонної теплової труби показали, що в зоні випарника

труби за рахунок стікання конденсату по гвинтовій канавці відбувається практично повне змочування стінки. Це забезпечує рівномірне розподілення робочого агента по поверхні труби і ефективний перенос тепла, що підтверджується рівномірністю температурного поля за всією довжиною зони випарника теплової труби.

Дослідження проводяться в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (Ресурс-2).

Висновки

Розширення масштабів використання геотермальних теплових насосів в житловому будівництві збільшує потенційний ризик забруднення підземних вод у разі витіку теплоносія. Альтернативою традиційним ґрунтовим теплообмінникам є глибинні геотермальні зонди на основі термосифонних теплових труб. В якості робочих тіл в термосифонах великої довжини необхідно використовувати екологічно безпечні холодоагенти з високим тиском насичення і великою густиною пари. За теплофізичними властивостями одним з найбільш придатних робочих тіл є двоокис вуглецю (R-744). У порівнянні з іншими холодоагентами R-744 має значно більші тиск насичення і величину об'ємної холодопродуктивності. В роботі вивчена можливість використання промислово виготовляємих гнучких гофрованих нержавіючих труб для створення термосифонних теплових труб. Показано, що безнасосний метод вилучення низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою глибинних термосифонних зондів дозволяє підвищити показник сезонної ефективності (SPF) геотермального теплового насоса на 15-20%.

Література

1. Lund J.W., Boyd T.L. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Geothermics. 2016. Vol. 60. P. 66-93.
2. Luo J., Rohn J., Xiang W., Bertermann D., Blum P. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems. Energy and Buildings. 2016. Vol. 117. P. 160-175.
3. «Про альтернативні джерела енергії». Закон України № 555-IV. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/555-15> (дата звернення: 05.05.2017).
4. Thermal use of the underground - Fundamentals, approvals, environmental aspects. VDI 4640 Part 1:2010. URL: https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1540489.pdf (дата звернення: 05.05.2017).
5. Снежкін Ю.Ф. Енергоощадні теплонасосні технології для систем теплопостачання житлово-комунального господарства і промисловості. Вісник Національної академії наук України. 2015. № 7. С. 23-31.
6. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 560 с.
7. Атлас енергетичного потенціалу відновлювальних та нетрадиційних джерел України / Київ: НАН України, Інститут електродинаміки, Державний комітет України з енергозбереження, 2001. 41 с.
8. Реализованные проекты в Украине с применением тепловых насосов. Тепловые насосы сегодня. Информационный бюллетень. 2016. № 1. С. 11-20.
9. Vasiliev L.L. Geothermal energy utilization with heat pipes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1990. Vol. 59. P. 1186-1190.
10. Ochsner K. Carbon dioxide heat pipe in conjunction with a ground source heat pump (GSHP). Applied Thermal Engineering. 2008. Vol. 28. P. 2077-2082.
11. Алтуний В.В., Геллер В.З., Петров Е.К., Рассказов Д.С., Спиридонов Г.А. Теплофизические свойства фреонов. т.1. / Под ред. С.Л. Ривкина. М.: Издательство стандартов, 1980. 232 с.
12. Алтуний В.В., Геллер В.З., Кременевская Е.А., Перельштейн И.И., Петров Е.К. Теплофизические свойства фреонов. т.2. / Под ред. С.Л. Ривкина. М.: Издательство стандартов, 1985. 264 с.
13. ECO-FLEX. Сильфонные шланги из нержавеющей стали. URL: <http://www.eco-flex.com.ua> (дата звернення: 05.05.2017).
14. Chalaev D., Silnyagina N., Shmatok A., Nedbailo A. Heat transfer enhancement in corrugated tube heat exchanger. Ukrainian Journal of Food Science. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 376-386.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН ДЛЯ ТЕПЛОНАСОСНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УКРАИНЕ

Уланов Н.М. канд. техн. наук, Уланов М.Н. канд. техн. наук,
Чалаев Д.М. канд. техн. Наук
Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

ABOUT OPPORTUNITY THE USE OF DEEP WELL FOR HEAT PUMPS HEATING IN UKRAINE

Ulanov N.M. Ph.D., Ulanov M.N. Ph.D., Chalaev D.M. Ph.D.
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

Аннотация: В условиях растущего дефицита ископаемых энергетических ресурсов и ужесточения требований к техногенному воздействию человека на окружающую среду актуальной задачей является расширение масштабов применения экологически чистых возобновляемых источников энергии. Одним из направлений решения данных задач может быть широкое развитие экологически чистой геотермальной энергетики путем использования существующего государственного фонда ранее пробуренных законсервированных скважин и теплонасосных технологий теплоснабжения.

По данным "Реестра скважин месторождений ПАО "Укргаздобыча" с повышенными значениями пластовых температур по состоянию на 01.01.2015 г." гидротермические параметры большинства месторождений Украины являются низкопотенциальными с температурами 50-70 °C, на ряде месторождений температуры составляют 80-120 °C, а на нескольких аномальных - 120-160 °C. Такие параметры вполне достаточно для полноценной тепловой генерации в системах отопления и горячего водоснабжения и в отдельных случаях - для прямой генерации электрической энергии. В рамках работы предложены технические решения и разработаны методики расчета систем теплонасосного теплоснабжения на базе ранее пробуренных глубинных скважин.

Выработанные нефтяные и газовые месторождения даже после их полного закрытия по добыче углеводородов остаются важным энергетическим ресурсом с годовым потенциалом геотермальной энергии эквивалентным 12 млн. т. у. т., что позволяет сэкономить 10,5 млрд. м³ природного газа.

Abstract: The increase of application of environmentally friendly renewable energy sources is the urgent task in the face of growing scarcity of fossil energy resources and stricter requirements for human impact on the environment. The development of obtaining clean geothermal energy by using the existing previously drilled and conserved wells with heat pumps heating is one of the directions for solving these problems.

The hydrothermal parameters of most deposits in Ukraine are low-potential with temperatures of 50-70 °C, at a number of deposits the temperatures are 80-120 °C and at several anomalous the temperatures are 120-160 °C according to the "Register of PJSC "UkrGasVydobuvannya" of well fields with increased reservoir temperatures on the date 01.01.2015". Such parameters are quite enough for valid thermal generation in heating and hot water supply systems and in some cases for direct generation of electric energy. The technical solutions and methods for calculating heat supply systems with use heat pumps based on previously drilled deep wells have been developed in the work.

The worked oil and gas fields, even after their complete closure or conservation, remain an important energy resource. The potential of geothermal resources is equivalent to 12 million tons of equivalent fuel per year which allows to save 10,5 billion m³ of natural gas.

Ключевые слова: глубокие скважины, тепловой насос, теплоснабжение, коэффициент преобразования (COP).

Keywords: deep wells, heat pump, heating, the coefficient of performance (COP).

Перевод экономики страны на энергосберегающий путь развития и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является приоритетной задачей долгосрочной энергетической политики Украины. Одним из наиболее энергоемких и социально значимых секторов экономики является теплоснабжения. В этом секторе потребляется около 40% энергоресурсов, используемых в стране, из которых более половины приходится на коммунально-бытовой сектор. Сектор теплоснабжения остро нуждается в разработке мероприятий и технических решений, направленных на повышение надежности, качества и экономичности. В ноябре 2016 года вступило в силу Парижское климатическое соглашение, в соответствии с которым среднемировые темпы сокращения эмиссии CO₂ должны составлять примерно 5,5% в год. Для выполнения этих требований необходима кардинальная перестройка энергетики, базирующейся

на сжигании ископаемого топлива, и перевод традиционных способов выработки тепловой энергии на возобновляемые и экологически безопасные источники энергии.

Существенный вклад в решение этих задач может внести широкое использование геотермальной энергии, которая образуется за счет радиоактивного распада долгоживущих изотопов содержащихся в геосферах Земли, а также перехода энергии гравитационной дифференциации в глубинных оболочках планеты в тепло, которое компенсирует его внешние потери и определяет возобновляемость геотермальных ресурсов [1]. Значительным преимуществом геотермальной энергетики является низкий уровень вредных выбросов, неисчерпаемость запасов и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года.

Подземная тепловая энергия масштабно используется в более 58 странах мира, а в некоторых из них уже свыше 100 лет для прямых технологий отопления и охлаждения жилья, а технологии непрямого использования подземной тепловой энергии существуют свыше 30 лет и в 21 стране энергию подземного тепла трансформируют в электрическую. Активно развивается геотермальная энергетика в странах ближайших соседей Украины – Польше, Венгрии, Словении [2]. В Украине разведанные геотермальные ресурсы в 20 раз больше, чем вместе взятые теплотворные полезные ископаемые (нефть, газ, конденсат, уголь, торф, древесина, растительная биомасса). Годовой потенциал геотермальной энергии эквивалентен 12 млн. т. у. т., что позволяет сэкономить 10,5 млрд. м³ природного газа. Несмотря на кажущуюся простоту и доступность использования геотермальной энергии, техническая и экологическая реализация этих технологий, является сложной научно-технической проблемой [3].

Таблица 1. Использование геотермальной энергии в некоторых странах мира по состоянию на 2015 г. (как для производства электроэнергии, так и прямого использования тепла)

Страна	электро- энергии	тепловой энергии		Страна	электро- энергия	тепловая энергия	
	МВт	МВт	ТДж/г		МВт	МВт	ТДж/г
Аргентина	-	163,60	1000,03	Португалия	29,0	35,20	478,20
Австралия	1,1	16,09	194,36	Россия	82,0	308,20	6143,50
Австрия	1,2	903,40	6538,00	Турция	397,0	2886,30	45126,00
Китай	27,0	17870,00	17435,00	США	3450,0	17415,91	75862,20
Франция	16,0	2346,90	15867,00	Украина	-	10,90	118,80
Германия	27,0	2848,60	19531,30	Польша	-	488,84	2742,60
Исландия	665,0	2040,00	26717,00	Словакия	-	149,40	2469,60
Италия	916,0	1014,00	8682,00	Венгрия	-	905,58	10268,06
Япония	519,0	2186,17	26130,08	Румыния	-	245,13	1905,32
Мексика	1017,0	155,82	4171,00	Болгария	-	93,11	1224,42

Общемировой объем инвестиций в геотермальную энергетику за последние 20 лет составил 22 млрд. долларов, большая половина из которых инвестирована частными структурами. Ожидаемые инвестиции на ближайшее 10 лет составят 18 – 20 млрд. долларов [4].

Основным фактором, сдерживающим развитие геотермальной энергетики в Украине, является высокая стоимость бурильных работ. В данной ситуации эффективным способом решения указанных проблем является извлечение геотермальной энергии путем использования существующего государственного фонда ранее пробуренных и законсервированных скважин. По приблизительным данным, в Украине существует около 20 000 добывающих, надзорных, разведывательных и других готовых скважин, из которых не менее двух тысяч содержат геотермальную составляющую.

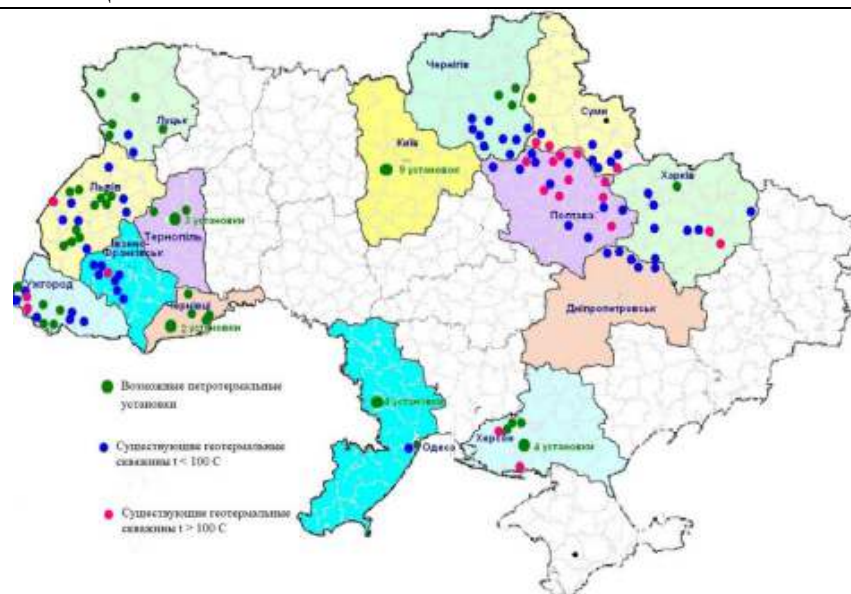


Рис. 1. Перспективные области для развития геотермальной энергетики в Украине с существующими геотермальными скважинами

Институтом технической теплофизики НАН Украины в сотрудничестве с НАК «Нафтогаз Украины» и ОАО «Укргаздобыча» собрана и систематизирована информация о законсервированных скважинах в Полтавской, Харьковской и Львовской областях, которые потенциально могут быть использованы для извлечения геотермальной энергии. Паспортные гидротермические данные скважин показывают, что большинства из них является низкопотенциальными с температурами около 50 °С, на ряде месторождений температуры составляют 70-100 °С, а на нескольких аномальных – 120-160 °С. Геологическими исследованиями установлено, что разведанный на сегодня потенциал термальных вод Украины составляет - 27 млн. м³/сут со средней температурой 70 °С. Суммарная экономия топлива по Украине, возникающая при использовании технически достижимого энергетического потенциала геотермальных источников энергии составляет 7,8 млн. т.у.т. или 6,9 млрд. м³ природного газа.

Таблица 2. Суммарное прямое использование геотермальной энергии в мире по различным категориям (мощность, МВт)

	1995 г.	2005 г.	2015 г.
Тепловые насосы	1854	15384	49898
Обогрев жилья	2579	4366	7556
Теплицы	1085	1404	1830
Бассейны	1097	616	695
С.-х. сушка	67	157	161
Индустриальное использование	544	484	610
Душевые	1085	5401	9140
Охлаждение/снеготаяние	115	371	360
Другое	238	86	79
Всего	8664	28269	70329

Одним из способов вовлечения в энергетический оборот низкопотенциальных геотермальных ресурсов, температурный потенциал которых недостаточен для прямой тепловой генерации в системах отопления и горячего водоснабжения, является создание систем теплоснабжения на основе теплонасосных установок парокомпрессионного или абсорбционного типа.

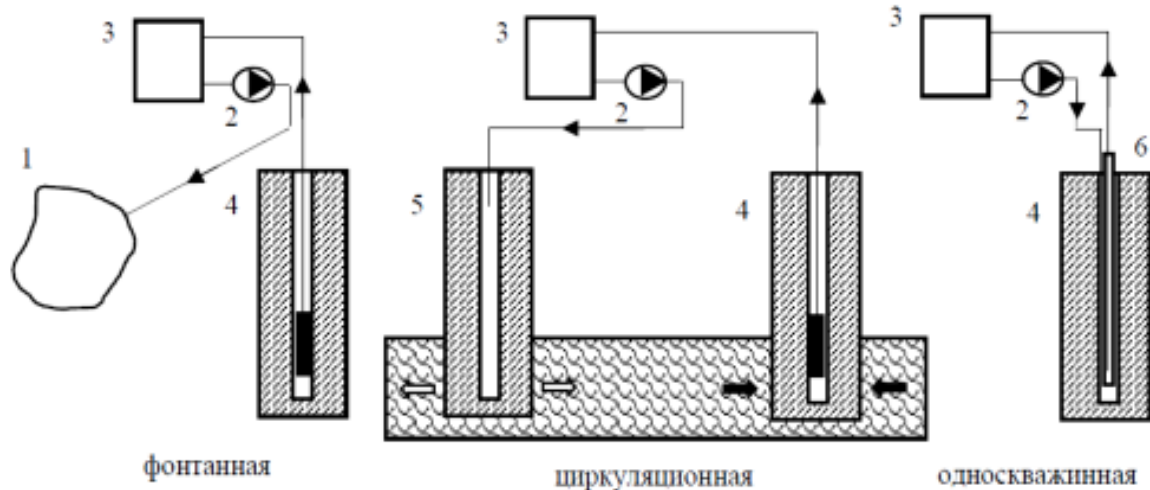


Рис. 2. Основные технологии извлечения геотермального тепла с помощью тепловых насосов

1 – водоем, 2 – насос геотермальной воды, 3 – тепловой насос, 4 – питающая скважина, 5 – скважина обратной закачки, 6 – скважинный теплообменник

Сегодня в мире работает свыше 20 млн. тепловых насосов мощностью от несколько киловатт до сотен мегаватт. Тепловая мощность мирового парка тепловых насосов, по минимальной оценке, составляет 300 тыс. МВт, годовая выработка теплоты свыше 1,8 млрд. Гкал, что соответствует замещению органического топлива в объеме до 160 млн. т. у. т. Мировой опыт показывает, что энергетические и экологические проблемы с неизбежностью приводят к необходимости широкого применения тепловых насосов [5]. К 2020 году по прогнозам Мирового энергетического комитета, доля тепловых насосов в мировом теплоснабжении составит 75%. Именно поэтому сегодня существует масса проектов применения тепловых насосов в пищевой, легкой, горнорудной промышленности, геотермальной энергетике и др. Но для выбора конкретного, наиболее эффективного типа теплового насоса и соответствующей технологии следует учитывать особенности их конструкции, области применения, требований экологии.

Введенные из эксплуатации скважины могут быть использованы для извлечения геотермального тепла путем различных технологий: фонтанной, циркуляционной и однокважинной. Схемы этих технологий приведены на рис. 2.

При фонтанной технологии горячая вода подается к испарителю теплового насоса, где происходит передача тепла быстро испаряющемуся хладагенту, пары которого сжимаются компрессором и направляются в конденсатор теплового насоса, где конденсируются при более высоком давлении, отдавая тепло воде циркулирующей в системе отопления здания. Охлажденная термальна вода сбрасывается в водоем или на рельеф. Эффективность работы теплового насоса по этой технологии повышается летом, когда тепловой насос работает в режиме холодильной машины. Фонтанная технология применима лишь в небольшом числе случаев из-за нерешенности проблем экологической безопасности – сброса отработанных термальных вод на рельеф, которые должны быть или пресными, или слабоминерализованными. Такие термальные воды составляют малую часть разведанных запасов.

Циркуляционная технология. Дальнейшее развитие освоения геотермальной энергии возможно с использованием технологии геотермальных циркуляционных систем. Эти технологии предусматривают извлечение термальной воды на поверхность, отбор тепла из нее и обратную закачку воды в пласт. Такой метод резко повышает потенциальную роль ресурсов глубинного тепла Земли, т.к. извлекается практически все тепло подземных вод, а также часть тепла водовмещающих горных пород. Кроме того, циркуляционная технология позволяет получить дополнительный технико-экономический эффект, за счет поддержания пластового давления, в результате чего может существенно увеличиться производительность скважин. Негативной стороной этой технологии является ее более высокая капиталоемкость и энергоемкость. Обратная закачка термальной воды в пласт с поддержанием пластового давления в 2 – 3 раза дороже фонтанной технологии. Кроме того, закачка отработанной, а, следовательно, более холодной термальной воды приводит к постепенному охлаждению пласта и снижению со временем теплового потенциала термальной воды.

При однокважинной технологии извлечение геотермального тепла происходит за счет его извлечения с помощью теплообменника встроенного в скважину вдоль центральной оси колонны. Скважина оборудуется насосом для циркуляции теплоносителя подаваемого в пространство между колонной и теплообменником. Теплоноситель нагревается от горных пород и по трубе теплообменника поступает в испаритель теплового

насоса, где процесс передачи тепла происходит так как и при фонтанной технологии, только охлажденный теплоноситель насосом подается в межтрубное пространство скважины и процесс повторяется. Такая технология в последнее время стала применяться в Германии, Швейцарии и других странах, благодаря ее эффективности и существенном сокращении капиталовложений в систему теплосбора [6]. По данным немецкого рынка при сравнении этой технологии с технологией геотермальной циркуляционной системой стоимость тепловой энергии будет на 20% ниже.

Примером геотермальной теплонасосной системы теплоснабжения может стать г. Самбор, Львовская область. В настоящее время теплоснабжение потребителей в г. Самбор в основном осуществляется от 9 котельных суммарной тепловой мощностью 42,6 Гкал/час с температурным графиком 95/70 °С. Топливом для этих котельных является природный газ. С целью перевода теплоснабжения г. Самбор на местный геотермальный ресурс предлагается создать экологически чистую геотермальную систему теплофикации с теплонасосной станцией, обеспечивающей нагрев сетевой воды в отопительный период до 95 °С и максимальное использование теплового потенциала геотермальной воды. В с. Пыняны расположением в 5 км от города Самбор имеется геотермальная скважина глубиной 2000 м и дающей на изливе 207 м³/сут. термальной воды с температурой 95 °С и минерализацией 48,6 г/дм³. В случае прямой утилизации тепла геотермальной воды через теплообменник для целей отопления и горячего водоснабжения, количество полученной при этом тепловой энергии составит 0,17 Гкал/ч, это объясняется маленьким дебитом существующей скважины. С целью повышения теплопроизводительности системы предложена каскадная система теплонасосной станции позволяющая максимально утилизировать тепло геотермальной воды. Принципиальная схема тепловой станции представлена на рис. 3.

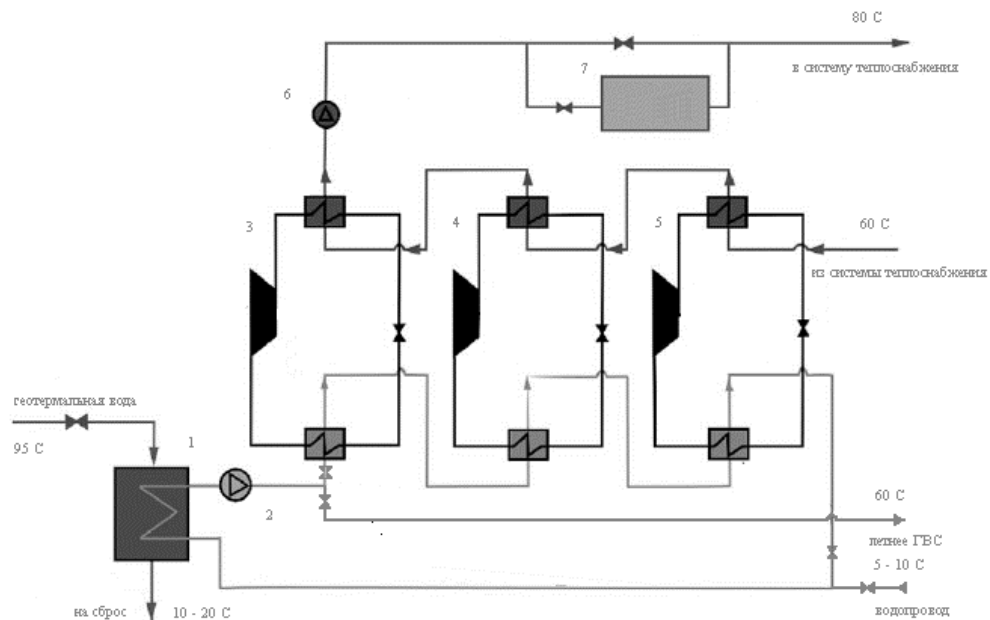


Рис. 3. Принципиальная схема геотермального теплоснабжения г. Самбор с использованием тепловых насосов

1 – геотермальный теплообменник, 2 – циркуляционный насос, 3, 4, 5 – тепловые насосы, 6 – сетевой насос, 7 – пиковая котельная

Станция имеет три контура: контур геотермальной воды; контур циркуляции промежуточного теплоносителя; контур системы теплоснабжения г. Самбор.

Геотермальная вода с этого месторождения с температурой 95 °С по трубопроводу поступает в теплообменник-утилизатор теплонасосной станции где охлаждается циркуляционной водой до температуры 10-15 °С и сбрасывается в зависимости от минерализации на рельеф пруд-отстойник. Геотермальная вода таким образом отделена от промежуточного теплоносителя или закачивается в приемную скважину циркуляционного контура, который в теплообменнике-утилизаторе нагревается до 40-45 °С. Затем промежуточный теплоноситель поступает в испарители последовательно включенных тепловых насосов, число которых определяется их техническими характеристиками.

На данной схеме показаны 3 последовательно включенных тепловых насоса. После охлаждения до 15 °С в испарителях промежуточный теплоноситель возвращается в теплообменник-утилизатор. Обратная сетевая вода с температурой 60 °С из системы теплоснабжения г. Самбор нагревается в конденсаторах

тепловых насосов до 80-85 °С. Догрев этой воды до 95 °С может быть осуществлен в пиковой котельной в зимний период года. В летний период времени потребность в горячем водоснабжении, если такая имеется, может быть обеспечена за счет тепла термальной воды без использования тепловых насосов. Расчетная теплопроизводительность этой станции 0,94 Гкал/ч. Объем сэкономленного природного газа необходимого для производства этого тепла в газовой котельной для целей отопления составит ~ 0,574 млн. м³. Таким образом, теплонасосная станция позволит в 5,5 раза повысить теплопроизводительность системы по съему теплового потенциала с геотермальной воды для целей отопления и горячего водоснабжения.

Выводы

1. Использование геотермальной энергии на значительной части территории Украины технически возможно и экономически целесообразно, а масштабы добычи ее должны обеспечить значительную долю в топливно-энергетическом балансе страны. Годовой потенциал геотермальной энергии эквивалентен 12 млн. т. у. т., что позволяет сэкономить 10,5 млрд. м³ природного газа.
2. Разработаны технико-экономические обоснования систем теплоснабжения использующих тепло глубоких скважин, в частности для г. Самбор, Львовской области предложенная теплонасосная установка позволяет в 5,5 раза повысить теплопроизводительность системы по съему теплового потенциала с геотермальной воды для целей отопления и горячего водоснабжения.
3. ИТТФ НАН Украины совместно с НАК «Нафтогаз Украины» и ОАО «Укргаздобыча» систематизировали сведения о законсервированных скважинах в Украине, которые потенциально могут быть использованы для извлечения геотермальной энергии. Геологическими исследованиями установлено, что разведанный на сегодня потенциал термальных вод Украины составляет - 27 млн. м³/сут со средней температурой 70 °С.
4. В ИТТФ НАН Украины предложены технические решения и разработаны методики расчета односкваженных теплонасосных систем теплоснабжения с замкнутым контуром циркуляции теплоносителя.

Литература

1. Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д. Тепло «сухих» горных пород» - неисчерпаемый возобновляемый источник энергии. Литология и полезные ископаемые, 2010, №6, с. 1 – 9
2. Свалова В.Б. Геотермальная энергетика. Проблемы развития. Материалы Международного конгресса «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность», Москва 13 – 14 октября, 2016, с. 33 – 38
3. Лимаренко А.Н., Тараненко О.О. Экологические последствия получения и использования геотермальной энергии в Украине. Технологический аудит и резервы производства, 2015, №3/1 (23), с. 4 – 7
4. Михайлюк А.Л., Калашников А.Е. Энергетическая безопасность Украины в Черноморском регионе. Аналитический доклад. Одесса, Феникс, 2011, 55 с.
5. John W. Lund and Tonya L. Boyd. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, p. 31
6. Калинин М.И., Баранов А.В. Метод расчета глубинных теплообменников для односкваженной технологии геотермального теплоснабжения. Разведка и охрана недр, 2003, №6, с. 53 – 60

ВПЛИВ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ

Авдєєва Л.Ю. д-р техн. наук, с.н.с., Макаренко А.А.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

THE INFLUENCE OF CAVITATION EFFECTS ON ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE OF WATER

Lesya Y. Avdeeva, Andrey A. Makarenko
Institute of Engineering Thermophysics of
the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Анотація: В статті розглянуті питання, пов'язані із виникненням і розвитком явища гідродинамічної кавітації при обробленні рідких гетерогенних систем. Показана актуальність і практична значимість використання ефектів, що супроводжують гідродинамічну кавітацію. Проаналізовано механізм інтенсифікуючого впливу дії ефектів кавітації в тепломасообмінних процесах. Виявлено недостатність існуючих результатів досліджень, стосовно дії ефектів, пов'язаних із її виникненням при різних гідродинамічних режимах руху рідин. На основі експериментальних досліджень показано залежність впливу гідродинамічних характеристик потоку на розвиток гідродинамічної кавітації і інтенсивність змін властивостей водопровідної води. Встановлено закономірності впливу кавітаційних ефектів, що виникають в проточному гідродинамічному змішувачі статичного типу на основні електрохімічні показники водопровідної води в залежності від геометричних характеристик кавітаційного реактора пристрою. Показано, що використання додаткового місцевого опору у вигляді діафрагми дозволяє посилити кавітаційний вплив на дослідні зразки, покращити гідродинамічні умови проведення процесу і підвищити інтенсивність змін електрохімічних показників. Встановлено, що збільшення тривалості кавітаційного впливу поглиблює зміни властивостей водопровідної води. Визначено поведінку електрохімічних властивостей активованої (катованої) води при витримюванні впродовж 24 годин. Отримані результати дають певну інформацію про електрохімічні властивості водопровідної води.

Abstract: The article deals with issues related to the emergence and development of hydrodynamic cavitation phenomena in the processing of liquid heterogeneous systems. Relevance and practical importance of the use of effects that accompany the hydrodynamic cavitation is shown. The mechanism of influence intensification of cavitation effects in heat and mass transfer processes is analyzed. The lack of existing research results concerning action effects associated with its origin at different hydrodynamic regimes of the fluid is revealed. Based on experimental studies, the impact of the dependence of hydrodynamic flow characteristics at developing the hydrodynamic cavitation intensity and changes in the properties of water is shown. The regularities of influence of cavitation effects, arising in a flow hydrodynamic static mixers, on basic electrochemical performance of water depending on the geometrical characteristics of cavitation reactor unit, are determined. It is shown that the use of additional local support in the form of a diaphragm allows to enhance cavitation effect on prototypes, improve hydrodynamic conditions of the process and increase the intensity changes of the electrochemical performance. It is established that increasing the duration of exposure aggravates cavitation change the properties of water. Conduct electrochemical properties of activated (tortured) of water in the holding within 24 hours is determined. The results give some information about the electrochemical properties of water.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, інтенсифікація масообмінних процесів, гідродинамічний змішувач статичного типу, електрохімічні властивості

Keywords: hydrodynamic cavitation, intensification of mass transfer processes, static hydrodynamic mixer, electrochemical properties

Одним з ефективних методів інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів у технологіях для різних галузей промисловості є використання ефектів кавітації. Кавітація – явище розриву суцільності рідини під впливом розтягуючих напружень і утворення заповнених парою і газом порожнин або бульбашок. В результаті різкого зниження тиску нижче за деяке критичне значення $P_{\text{кав}}$ в окремих точках системи або навколо них виникають умови для розриву суцільності рідини і формування каверн, заповнених парою або газом. При різкому підвищенні тиску створюється велика різниця тисків між рідкою і паровою фазами, каверни рухаються із зони низького в зону високого тиску, в результаті чого відбувається їх зростання і зхлопування. Різниця тисків визначає рівень акумульованої в системі потенційної енергії, яка перетворюється в кінетичну енергію радіального руху рідини бульбашки, яка стискається, а при повторній трансформації – в короткочасний імпульс, що поширюється у формі ударної сферичної хвилі. При зхлопуванні каверни безпосередньо поблизу твердих частинок кінетична енергія радіального руху рідини

перетворюється на механічну енергію рідкого кумулятивного мікроструменя з великою інтенсивністю впливу. Викид кумулятивного мікроструменя супроводжується виникненням аномально високих локальних тисків, температур, швидкостей і прискорень. Така трансформація енергії сприяє значному підвищенню ефективності динамічного впливу на складні гетерогенні системи [1-4].

Значення кавітації визначається її проявами, які можна розділити на небажані і позитивні. Некерована кавітація може призвести до серйозних змін роботи обладнання і навіть руйнування конструкції [3, 5, 6]. Однак, в той же час, використання кавітаційних ефектів дозволяє вирішити питання інтенсифікації багатьох технологічних процесів, збільшити їх продуктивність, забезпечити значну економію енерговитрат і високу якість обробки дисперсних систем. Інтенсифікуючий вплив кавітації обумовлений виникненням ряду супутніх ефектів, до них можна віднести ті, що призводять до зміни властивостей і структури матеріалу: механічне руйнування; дифузія, зміна електропровідності і електричного потенціалу, окиснення, відновлення та ін. [7].

На сьогодні вже накопичений значний досвід по використанню гідродинамічної кавітації для інтенсифікації процесів масообміну - перемішування, розчинення, диспергування, емульгування та ін., які відносяться до енерговитратних. Інтенсивність кавітаційного впливу залежить від властивостей середовищ і гідродинамічних умов в потоці, які розрізняються для різних типів місцевих опорів, їх конструктивних особливостей і геометричних характеристик. [1, 2, 4].

При гідродинамічній кавітації в результаті зхлопування бульбашки утворюються іонізовані молекули і вільні радикали, що призводить до активації води, зміни її фізико-хімічних і електрохімічних властивостей. Ці властивості визначають умови проходження багатьох технологічних і біологічних процесів, а також кінцеву якість матеріалу [8, 9]. Через велику різноманітність пристроїв, в яких реалізуються умови для виникнення і розвитку гідродинамічної кавітації існуючі результати, стосовно змін властивостей водних середовищ є неоднозначними.

Мета досліджень – експериментальні дослідження впливу кавітаційних ефектів, що виникають в проточному гідродинамічному змішувачі статичного типу на основні електрохімічні показники водопровідної води в залежності від геометричних характеристик профілю пристрою. Під час виконання досліджень визначались: водневий показник (рН), окислювально-відновний потенціал (ОВП), електропровідність. В дослідженнях використовувалась свіжовідібрана відфільтрована водопровідна вода.

Для проведення досліджень був створений експериментальний стенд на робочій ділянці якого створювався потік рідини певної швидкості і тиску. Стенд змонтований на пересувній платформі і складається з пульту управління, системи відцентрових одноступеневих насосів із запірною арматурою, змінного кавітаційного реактора, діафрагми, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком, циліндричної ємності, з'єднувального трубопроводу та вивідного патрубку.

Кавітаційний реактор представляє собою сопло з геометричними розмірами: діаметр вхідного і вихідного каналу 0,042 м, кут розкриття конфузора 90°, кут розкриття дифузора 120°, довжина горловини сопла 0,020 м. Дослідження проводились при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,004 м, 0,008 м, 0,012 м і 0,016 м. В потоці після соплового пристрою встановлювалась діафрагма, що перекриває перетин потоку на 75% площі.

Водневий показник (рН) характеризує концентрацію вільних іонів водню у воді. Величина рН визначається кількісним співвідношенням у воді іонів H^+ і OH^- , що утворюються при дисоціації води. При розчиненні у воді хімічних речовин або під дією різних видів фізичних впливів співвідношення іонів може бути порушено, що приводить до зміни значень рН.

Результати досліджень визначення рівня рН водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі зі змінними реакторами при поступовому збільшенні тривалості наведені на рис.1.

Одержані результати показують (рис.1), що збільшення тривалості обробки призводить до поступового підвищення рівня рН води на 0,2-0,4 одиниці. Для всіх дослідних зразків найбільші зміни значень відбуваються в результаті першого циклу диспергування, що свідчить про найбільшу ефективність процесу. При збільшенні кількості циклів обробки інтенсивність зростання значень рН поступово знижується. Так, в результаті одного циклу обробки для першого дослідного зразка значення зросло на 2,3%, а в результаті одинадцяти - ще на 3,5%. Одержані дані пояснюються особливостями кавітаційного диспергування в апаратах періодичної дії при якому при кожному послідовному циклі прокачування матеріалу через активну зону рівень кумулятивного впливу кавітаційних бульбашок знижується.

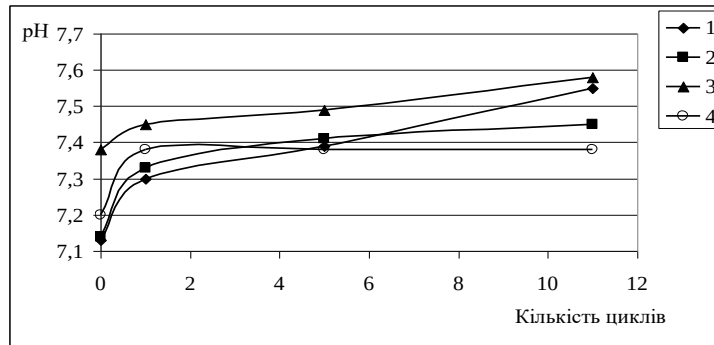


Рис. 1. Залежність значень pH водопровідної води від кількості циклів кавітаційної обробки при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора: 1 – 0,004 м; 2 – 0,008 м; 3 – 0,012 м; 4 – 0,016 м

Аналіз одержаних даних висвітлює взаємозв'язок геометричних параметрів кавітаційного реактора, гідродинамічної характеристикою течії і ефектами кавітації. Так, збільшення діаметра сопла з 0,004 м до 0,016 м зменшує швидкість потоку в соплі, збільшує витрати рідини і продуктивність процесу, але зменшує кавітаційний вплив на середовище. Найбільше зростання pH (на 0,4-0,5 одиниць після 11 циклів) спостерігається у зразка, отриманого в результаті обробки в кавітаційному реакторі з діаметром горловини сопла 0,004 м. Зі збільшенням розміру прохідного діаметру горловини сопла реактора кавітаційний вплив послаблюється. Внаслідок цього найменші зміни значень pH відбулися для зразка, отриманого в результаті обробки в реакторі з діаметром горловини сопла 0,016 м. Для цього зразка рівень pH води після 1 циклу і до кінця обробки залишається майже незмінним.

Результати досліджень по визначенню впливу використання діафрагми, що перекриває площу потоку на 75% на зміну рівня pH водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при поступовому збільшенні тривалості наведені на рис. 2. Результати порівнювались з одночасно відібраною контрольною пробою води, що не проходила обробку.

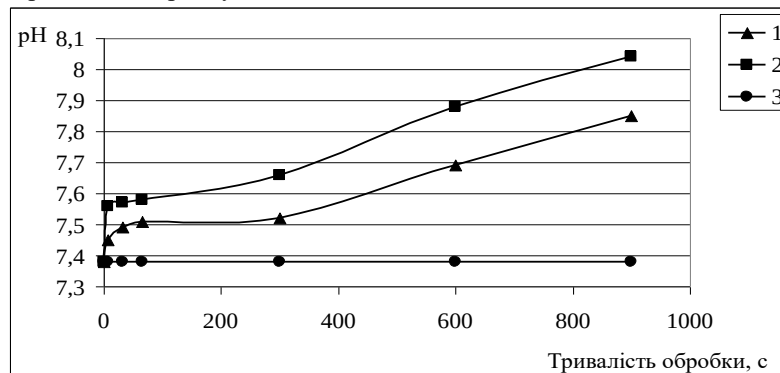


Рис. 2. Залежність значень pH водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора 0,012 м: 1 – без діафрагми; 2 – з діафрагмою; 3 – контрольний зразок без обробки

Результати досліджень (рис. 2) показали, що встановлення діафрагми викликає посилення кумулятивних впливів і зміну властивостей середовища, в т.ч. зміну значень pH дослідних зразків, отриманих в результаті запропонованої обробки. В результаті кавітаційного впливу на дослідний зразок (1) значення pH збільшились на 0,5 одиниць за 900 с обробки. Встановлення діафрагми призводить до покращення умов диспергування і значення pH додатково підвищуються ще на 0,2 одиниці при тій же тривалості впливу на зразок. Збільшення тривалості обробки посилює інтенсивність впливу кавітаційних ефектів на цей показник. Таким чином, наявність регулюючої діафрагми дозволяє суттєво впливати на умови виникнення і розвитку кавітаційних ефектів.

Інший показник, що дозволяє охарактеризувати електрохімічні зміни у воді під впливом кавітаційної обробки – окислювально-відновний потенціал (ОВП). Він характеризує ступінь активності електронів в окислювально-відновних реакціях і має значний вплив на функціонування електроактивних компонентів клітин біологічних систем. Найбільшою окислювальною здатністю характеризується кисень, а відновною – водень. В організмі людини ОВП внутрішнього середовища клітин в нормі завжди менше нуля і значення знаходяться в межах від – 60 мВ до – 200 мВ. У природній воді значення ОВП коливаються від – 400 мВ до

+700 мВ, середньому від +100 до +500 мВ. Для її засвоєння організмом людини необхідно витратити енергію на корекцію активності електронів.

Результати досліджень ОВП водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при різних діаметрах горловини сопла наведені на рис.3.

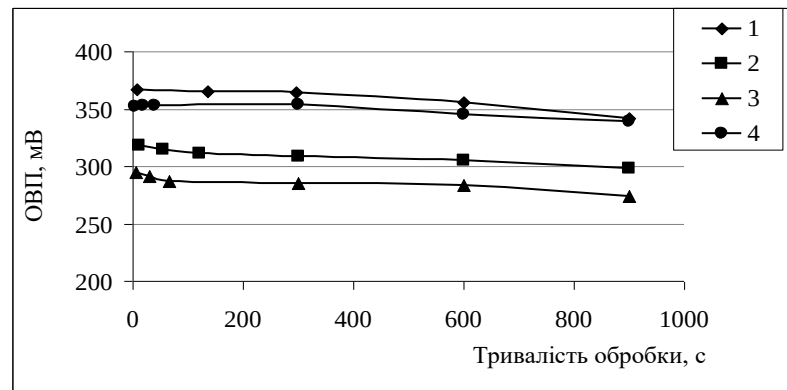


Рис. 3. Залежність значень ОВП водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора: 1 – 0,004 м; 2 – 0,008 м; 3 – 0,012 м; 4 – 0,016 м

Отримані результати (рис.3) дозволили охарактеризувати вплив кавітаційних ефектів, що виникають під час запропонованої обробки на ОВП води. Вже в результаті короточасного впливу при першому циклі оброблення води спостерігається зниження рівня ОВП для всіх дослідних зразків. Посилення кавітаційного впливу за рахунок збільшення тривалості обробки призводить до поступового зниження значень цього показника. Так, за 15 хв. обробки значення знизились на 6,5-7%. В той же час, наведені залежності показали, що зміна діаметра горловини сопла реактора даної конструкції змішувача не впливає на інтенсивність зміни значень ОВП. Таким чином, було встановлено, що ефекти викликані дією гідродинамічної кавітації дозволяють знизити показники ОВП, що в свою чергу призводить до покращення біоенергетичних, метаболічних і імуностимулюючих властивостей води.

На рис. 4 наведені результати досліджень по визначенню впливу діафрагми, що перекриває площу потоку на 75% на ОВП водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при поступовому збільшенні тривалості впливу. Одержані результати порівнювались з контрольною пробою води, що не проходила обробку.

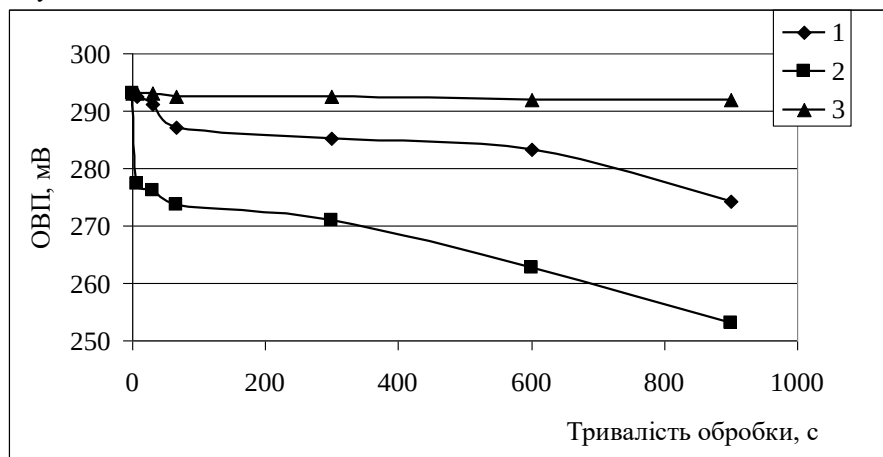


Рис. 4.Залежність ОВП водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини сопла змінного кавітаційного реактора 0,012 м: 1 – без діафрагми; 2 – з діафрагмою; 3 – контрольний зразок без обробки

Аналіз одержаних даних (рис.4) підтверджує висновки попередніх досліджень про значний вплив діаметра горловини сопла на зміну гідродинамічних умов проведення процесу, виникнення явища кавітації і дію супутніх ефектів на властивості дослідних систем. Порівняння значень ОВП зразків води, отриманих в результаті обробки в кавітаційному апараті з використанням діафрагми і без неї, показало сприяння її встановлення протіканню кавітаційних ефектів. Використання діафрагми посилює вплив на дисперсійне середовище, що призводить до більш інтенсивної зміни значень ОВП. Обробка зразка без діафрагми зменшує значення ОВП на 20 одиниць, а її використання зменшує ці значення ще у 2 рази, порівняно до

контрольного. Посиленню впливу кавітаційних ефектів на дослідні зразки також сприяє збільшення тривалості обробки. Так, при обробці впродовж 66 с спостерігається зменшення значень ОВП на 2%, а в результаті оброблення впродовж 900 с - ще на 4,5%. Таким чином, доведено позитивний вплив гідродинамічної кавітації на ОВП води.

Для визначення тривалості збереження електрохімічних властивостей дослідних зразків активованої води були проведені дослідження з визначення зміни їх значень при витриманні після кавітаційної обробки впродовж 24 год. Результати вимірювань порівнювались з одночасно відібраною контрольною пробою, що не проходила обробку. Отримані результати показали, що активована (кавітована) вода, одержана на експериментальному кавітаційному апараті, зберігає свої властивості впродовж не більше 24 год. Збільшення тривалості кавітаційної обробки сприяє підвищенню значень рН і накопиченню груп OH^- . Наявність діафрагми дозволяє збільшити ефективність кавітаційного впливу під час процесу обробки, а також сприяє більш повільному зниженню інтенсивності зміни показника рН впродовж зберігання. Причому, чим більше енергії витрачається в процесі обробки, тим менше змінюються його властивості в подальшому в процесі витримки.

Результати досліджень ОВП після витримки дослідних зразків впродовж 24 год. підтвердив висновки попередніх досліджень і показав, що збільшення тривалості знаходження дослідних зразків в зоні гідродинамічної кавітації посилює активний вплив на середовище, в т.ч. призводить до зменшення значень ОВП і збільшення активності електронів. Визначення показника ОВП через 24 год. показали, що витримка всіх зразків призводить до подальшого зменшення показників ОВП у всіх зразках. Причому, чим більше енергії витрачається в процесі обробки за рахунок збільшення тривалості процесу, тим більші зміни властивостей відбуваються зі зразком під час обробки і тим менше він змінюється в подальшому в процесі витримки. Так, найменші зміни під час витримки відбулися зі зразком, який був оброблений в апараті з діафрагмою впродовж 900 с. Значення ОВП дослідного зразка, одержаного при обробленні впродовж 300 с через 24 год. витримування наближаються до значень контрольного зразка води, що не проходив обробку, на відміну від значень інших дослідних зразків.

Висновки.

Проведеними дослідженнями доведений взаємозв'язок між характеристиками гідродинаміки потоку, виникненням і розвитком гідродинамічної кавітації і впливом викликаних ефектів, що викликає ту чи іншу інтенсивність зміни властивостей, в т.ч. значень електрохімічних показників водопровідної води. Показано, що використання додаткового місцевого опору у вигляді діафрагми, що перекриває потік на 75% дозволяє посилити кавітаційний вплив на дослідні зразки, покращити гідродинамічні умови проведення процесу і підвищити інтенсивність змін електрохімічних показників. Встановлено, що збільшення тривалості обробки поглиблює зміни властивостей водопровідної води і впливає на зміну значень при витриманні впродовж 24 годин.

Література

1. Перник А.Д. Проблемы кавитации / А.Д. Перник.- М., Судостроение, 1966. - 439 с.
2. Gogate P. A A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future/ P.R. Gogate, A.B. Pandit Ultrasonics Sonochemistry – 2005. - №12. – P. 21–27.
3. Young F.R. Cavitation/ London, U.K. : Imperial College Press, 1999. – 418 p.
4. Braeutigam P. Role of Different Parameters in the Optimization of Hydrodynamic Cavitation/ P. Braeutigam, M. Franke, Zhi-Lin Wu, B. Ondruschka - Chem. Eng. Technol. – 2010,33. – No. 6 – P. 932–940.
5. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах/ Т.М.Вітенько. - Тернопіль: ТДТУ ім.І.Пулюя, 2009. - 220 с.
6. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах / В. Я. Карелин. М., Машгиз. – 1963. 2-е изд. 1975. – 336 с.
7. Саркисов Г.Н. Структурные модели воды / Г.Н.Саркисов// УФН, 2006, Т.176, №8.-С.833-845.
8. Долинский А.А., Басок Б.И. Наномасштабные эффекты при дискретно-импульсной трансформации энергии / Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: темат. зб. статей / под общ. Ред..А.А.Долинского; И-т технической теплофизики НАН Украины.-К.: Академперіодика, 2015.- С. 422-437.
9. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А. Вода в условиях обработки ДИВЭ / Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: темат. зб. статей / под общ. Ред..А.А.Долинского; И-т технической теплофизики НАН Украины.-К.: Академперіодика, 2015.- С.292-299.

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЙ
КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ**

**Бурдо О.Г., д-р техн.наук, профессор ,
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
Давар Ростами Пур, firma «D.R.P.», Teheran, Iran**

**ENERGY MONITORING OF TECHNOLOGIES OF
CONCENTRATION**

**Bourdo O.G., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa
Davar Rostami Pur, , firma «D.R.P.», Teheran, Iran**

Аннотация. Проведено сравнение традиционных и предложенных технологий концентрирования пищевых растворов. Рассмотрены традиционные энерготехнологии конвективной сушки и выпарки. Анализируются схемы направленного энергетического действия, предложенные авторами. Показано, что инновационные энерготехнологии блочного вымораживания и микроволновой выпарки имеют существенные преимущества как по затратам энергии, так и по качеству готового продукта.

Annotation. The traditional and proposed technologies for concentrating food solutions are compared. Traditional energy technologies for convective drying and evaporation are considered. Schemes of directional energy action proposed by the authors are analyzed. It is shown that innovative energy technologies of block freezing and microwave residue have significant advantages both in energy costs and in the quality of the finished product.

Ключевые слова: пищевые концентраты, энергетическая эффективность, соки, выпаривание, криоконцентрирование.

Key words: food concentrates, energy efficiency, juices, evaporation, cryoconcentration.

1. Введение. Концепция функционального питания [1, 2] предполагает широкое использование соковой продукции. На рынке соков наблюдается высокая конкуренция. 98% всей продукции на украинском рынке соков представлены 4 крупными компаниями: Sandora, Vitmark, Coca-Cola и Эрлан. Структура рынка соков по наиболее популярным торговым маркам выглядит так [3]. На первом месте сок Садочок с долей рынка 27,3%, за ним следуют Наш сок – 22,1%, Сандора – 15,7%, Биола – 5,2%, Добрый – 4,3%, Джаффа – 3,2%, Соки Лето – 3,1%, Рич – 1,4%, Ботаник – 1% и другие – 16,7%. В результате маркетинговых исследований [4, 5] делается прогноз на рынке соков в Украине:

- положительная динамика развития рынка;
- обострение конкуренции, усиление борьбы за внимание потребителей;
- увеличение доли сегмента соков прямого отжима.

На рынке Украины растет интерес к сокам, которые слабо представлены в продаже – например, к гранатовому. Однако такой сок выпускается исключительно *ООО «Саратский завод продтоваров»*, где разработаны и запущены в производство соки под новыми торговыми марками «Мистер Гранат» и «Гранатовая долина». Производятся так же миксы из сока граната и соков из фруктов и ягод. Производство соответствует международной системе стандарта качества ISO 9001. Соки и нектары ТМ «КВАНТ», «Мистер Гранат» и «Гранатовая долина» производятся на оборудовании, которое не использует красители, консерванты, стабилизаторы и другие искусственные добавки. Соки и нектары разливаются исключительно в стеклянной таре объемом 0,3л, 0,5л, 1л, 2л, 3л. Использование стеклянной тары позволяет в два-три раза увеличить срок хранения, а потребитель может визуально убедиться в качестве продукта.

Определяющим успех этих соков является эффективная инновационная технология концентрирования. Известно, что высоким качеством отличаются плоды граната, выращенные в Иране и Азербайджане. Поэтому, для Украины производство гранатового сока рационально осуществлять по технологии переработки концентрата путем восстановления, добавления удаленной воды. В первую очередь, качество такого готового продукта будет определяться технологией его сгущения. Однако отвечающие современным требованиям по качеству готового продукта, по энергоемкости, технологии концентрирования отсутствуют. Поэтому задача поиска инновационных подходов при производстве концентратов гранатового сока актуальна и для Украины, и для стран, которые располагают лучшим сырьем. Проведем анализ традиционных технологий производства концентратов.

2. Обзор литературных источников и формулировка проблемы

Принципіально можливо 3 підхода рішення задачі удалення води из раствора: превращение ее в пар с последующим отводом пара и его конденсацией (процесс выпаривания), механическое отделение воды с помощью полупроницаемых мембран и превращения воды в твердую фазу и удаление ее в виде льда. Рассмотрим достоинства и недостатки этих технологий.

2.1. Концентрирование при выпаривании растворов

Концентрирование растворов путем перевода воды в пар широко развито в пищевых технологиях. Выпаривание – чисто тепловой процесс, движущей силой которого является разность температур [6]. Это не самый энергорасточительный процесс, но, учитывая огромные объемы выпариваемого сырья, суммарные расходы энергоносителей на выпарку существенны и в значительной степени определяют энергоемкость пищевых производств. Отрасли пищевой промышленности являются одними из главных потребителей энергоресурсов [7]. Так в США этот показатель составляет 10^{17} Дж, для Великобритании – $2,7 \cdot 10^{17}$ Дж, для Голландии – $0,7 \cdot 10^{17}$ Дж [7, 8]. Известно, что инвестировать в энергоэффективные технологии на порядок выгоднее, чем в добычу нефти, тем более, что запасы органического топлива стремительно уменьшаются [7]. Подавляющее большинство пищевых растворов выпаривают влагу под вакуумом, что позволяет снизить температуру кипения до 40-60 °С.

Однако некоторые виды соков, например цитрусовые, особенно чувствительны к нагреванию. А, например, яблочный, вишневый - могут выдержать кратковременное нагревание при 45-55 °С без заметного изменения натуральных свойств [9 - 17].

Отрицательное воздействие теплоты на концентрируемый продукт сказывается, прежде всего, на его цвете. Потемнение вызывается промежуточным продуктом - оксиметилфурфуролом, образующимся в присутствии сахаров и кислоты. В связи с этим, количество образовавшегося оксиметилфурфуrolа часто является одним из критериев качества плодово-ягодных соков и концентратов. Высокие количества его свидетельствуют о чрезмерности тепловой обработки. Современная техника выпаривания предусматривает получение соков, их очистку от взвесей, улавливание ароматических веществ, осветление и фильтрование деароматизированных соков и уваривание их до нужного содержания сухих веществ. Ароматические вещества определяют характерный аромат плодов, овощей и соков из них. Эти вещества имеют важное значение для качества соков и оказывают физиологическое воздействие. Несмотря на простоту техники выпаривания, эти технологии нельзя считать отвечающим современным требованиям к качеству пищевого продукта, тем более для гранатового сока.

2.2. Мембранные технологии концентрирования

Классификация мембранных процессов включает: обратный осмос, ультрафильтрацию, микрофильтрацию и электродиализ. В зависимости от характера преобладающих движущих сил (диффузионные или гидродинамические) мембранные технологии относятся к фильтрационным либо массообменным методам разделения жидких систем.

Процесс осмоса, который используется в большинстве мембранных технологий, заключается в том, что растворитель походит через полупроницаемую мембрану и разбавляет раствор [18, 19]. Процесс перехода происходит до определенного предела, при котором гидростатическое давление раствора становится равным осмотическому давлению. Если на раствор, находящийся в состоянии равновесия с водой, оказать давление, превышающее осмотическое, то вода из раствора будет походить через мембрану в воду, находящуюся за перегородкой. На этом принципе и основан обратный или реверсивный осмос.

При концентрировании этим способом через мембрану проходит почти чистая вода, в результате чего концентрация обрабатываемого продукта повышается. В консервной промышленности обратный осмос применяется для концентрирования овощных и фруктовых соков, а в молочной промышленности - для концентрирования молочной сыворотки, питьевого молока и пахты. К преимуществам обратного осмоса относятся: низкие энергетические затраты; улучшение качества концентрата, вследствие низкой температуры процесса; хорошие санитарные условия производства. Все это объясняется тем, что мембранная технология не требует затрат энергии на фазовые превращения воды.

Максимально обратным осмосом можно добиться концентрации 30-40% сухих веществ. Более высокой концентрации добиваться неэффективно, так как при этом необходимы высокие давления для преодоления осмотического давления, высокий расход электроэнергии и установки больших размеров. Также низкое внедрение мембранных технологий связано с недостаточным ассортиментом и качеством выпускаемых промышленностью мембран, аппаратов и установок для мембранных процессов. Немаловажным фактором, тормозящим внедрение мембранной технологии, является несовершенство мембран, ее сложность и высокая стоимость. Несовершенны и дорогостоящие также мембранные установки, используемые в пищевой промышленности. Кроме того, в Украине отсутствует производство мембран и мембранных картриджей.

2.3. Криоконцентрирование

Для повышения концентрации пищевых жидкостей перспективны технологии, основанные на низкотемпературном обезвоживании продуктов – сублимационная сушка и концентрирование вымораживанием.

Концентрирование вымораживанием основано на охлаждении продукта ниже температуры его замерзания. При этом часть воды вымерзает и, в виде кристаллов льда, отделяется от концентрата.

Метод концентрирования вымораживанием основан на том явлении, что в объеме формируются мелкие и крупные кристаллы льда. При флуктуациях температуры в объеме продукта происходят фазы плавления и роста кристаллов. Мелкие кристаллы могут плавиться. Крупные кристаллы, в свою очередь, увеличиваются в размерах.

Концентрирование вымораживанием жидких пищевых продуктов, особенно термолабильных, или содержащих большое количество ароматических веществ, обеспечивает наиболее полное сохранение исходных свойств сырья. Это обуславливается тем, что процесс ведется при низких температурах и сырье претерпевает минимальные качественные изменения. Концентрат после разведения водой дает продукт, по химическому составу и органолептическим свойствам близкий к свежему исходному сырью [20]. Кроме того концентрирование вымораживанием менее энергоемкое так как теплота льдообразования приблизительно в 8 раз меньше теплоты парообразования. А за счет использования холодильной техники фактические затраты энергии на кристаллизацию снижаются в 15-20 раз [7, 20, 21].

Степень концентрации соков, в первую очередь, зависит от их химического состава. Концентрировать предпочтительно соки с высокой сахаристостью. Нежелательно концентрировать соки, начавшие бродить, так как наличие спирта не только понизит температуру замерзания сока, но и увеличит потери.

Возможная степень концентрации сухих веществ различных соков неодинакова. Например, при 50 % сухих веществ вязкость черносмородинового сока в два раза превышает вязкость виноградного и, следовательно, концентрировать виноградный сок можно в большей степени, чем черносмородиновый. Дальнейшее повышение концентрации соков проводится путем сушки. Сравним энергетику применяемых технологий обезвоживания и разработанной в ОНАПТ технологии блочного вымораживания [21] и электромагнитной выпарки.

3. Результаты исследований и их обсуждение.

Корректное сравнение предложенных схем концентрирования по энергетическим характеристикам связано с проблемой, что в разных схемах используются разные источники энергии. В таких ситуациях используются следующие методы: эксергетический и энергетического менеджмента. Эксергетический метод дает строгий термодинамический анализ [22], но для обоснования производственных достоинств, экономики он достаточно спорный. Представляется, что основой экономического анализа наиболее перспективным является метод энергетического менеджмента [7, 22], который дает простые и надежные возможности для экономической оценки. Особенно этот метод удобен для условий Украины, в условиях нестабильных, непрогнозируемых и серьезно меняющихся цен на топливные ресурсы. Результаты анализа методом энергетического мониторинга удобны для сравнения технологий в разных экономических системах, для экономик разных стран. Поэтому выберем метод энергетического менеджмента как основной для сравнения традиционных и предлагаемых схем.

Ставится задача сравнить энергетику следующих технологий концентрирования:

- традиционная конвективная сушка;
- традиционная выпарка;
- инновационные схемы электромагнитной выпарки;
- инновационная схема криоконцентрирования (блочного вымораживания).

Поскольку все эти схемы используют различные виды энергии, анализ сводится к эффективности использования в схеме первичного топлива органического происхождения с теплотворной способностью 40МДж/кг.

Методология энергетического менеджмента основана на системном анализе всей технологической цепочки «первичное топливо – его трансформации в соответствующий вид энергии – распределительная сеть - потребитель».

Подробно конверсия энергии топлива в элементах установок поясняется схемами (рис.1). Поскольку анализируются технологические комплексы, где элементы расположены компактно, влияние распределительной сети не учитывается.

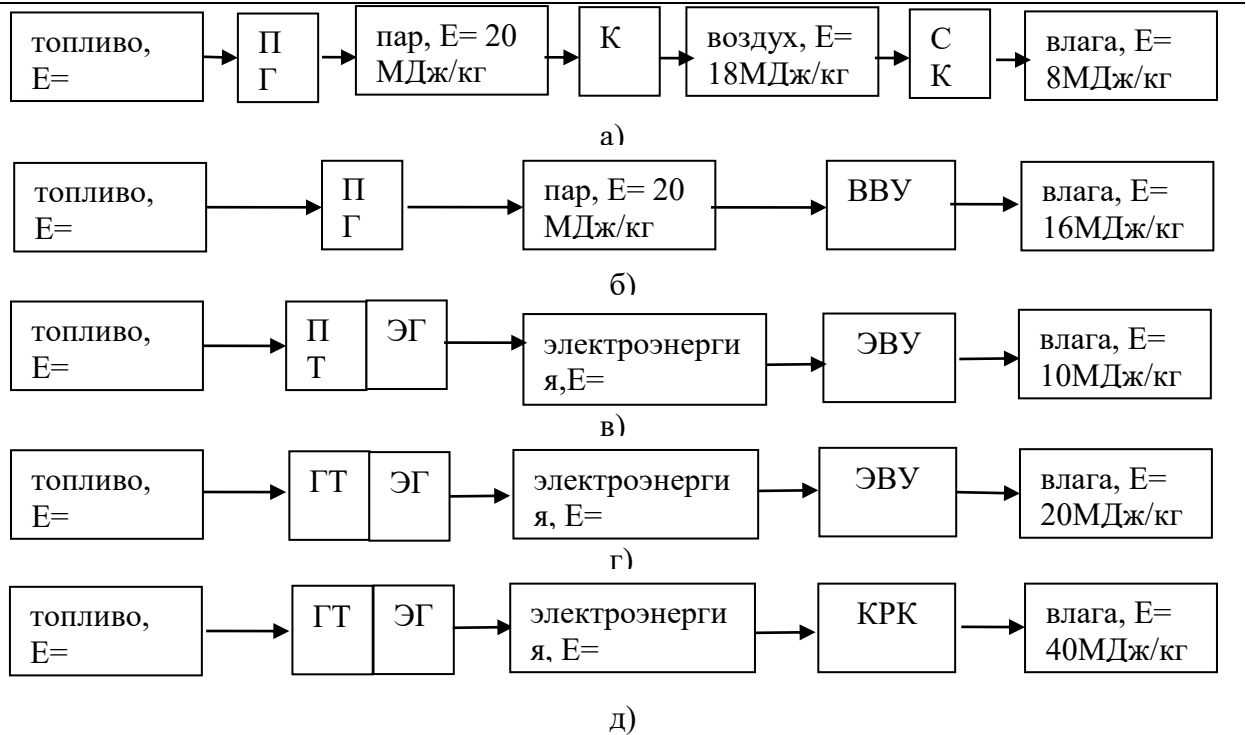


Рис. 1. Конверсия энергии в технологиях обезвоживания (все параметры приведены к 1кг топлива): а) – традиционные конвективные технологии сушки; б) – традиционная технология выпаривания; в), г) - микроволновая выпарка; д) - криоконцентрирование.

На рис.1 приняты следующие обозначения: ПГ - парогенератор; К – паровой калорифер; СК – конвективная сушильная камера; ВВУ – вакуум-выпарная установка; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; ГТ – газовая турбина; ЭВУ – электромагнитная сушильная камера; КРК - криоконцентратор. В расчетах принято: энергетический КПД преобразования топлива в электроэнергию на паротурбинных электростанциях 32%, а на газотурбинных 60%; КПД преобразования электрической энергии в МВ-камерах 75%, а электрический холодильный коэффициент 1,5 – 2.

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических преимуществах предлагаемых аппаратов. Естественно, капитальные затраты на проектирование и изготовление таких аппаратов окажутся выше, чем у традиционных конструкций, что требует отдельных расчетов.

Условием функционирования электромагнитных аппаратов являются следующие факторы:

- наличие в объеме продукта жидкости с полярными молекулами;
- соответствие параметров электромагнитного поля решаемой задачи теплопереноса;
- согласование структурных характеристик продукта с параметрами электромагнитной энергии.

Для гранатового сока указанные условия выполняются. Важно, что предложенные технологии концентрирования соков при низких температурах гарантируют сохранение питательного потенциала плодов [22]. А это повысит конкурентоспособность продукции на рынках соков.

Выводы. Процессы концентрирования являются ключевыми во многих пищевых технологиях. Они определяют качество готового продукта и энергетические затраты на проведение процесса. Современные требования к пищевым продуктам, определяемые концепцией функционального питания, регламентируют температурный уровень обработки сырья. Стремительный рост стоимости энергетических ресурсов выдвигает требования к производителям снижения затрат энергии, пересмотру традиционных технологий, поиску новых принципов обезвоживания продуктов. Предложенные в работе инновационные низкотемпературные технологии концентрирования пищевых растворов по энергетическим и по качественным параметрам отвечают современным требованиям к продуктам функционального питания.

Література

1. Weststrate J.A., G. van Poppel, P.M. Verschuren /Functional foods, trend and future British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 233-235.
2. Осипова Л.А. Функциональные напитки /Осипова Л.А., Капрельянц Л.В., Бурдо О.Г. Одесса «Друк», 2007.-288с.
3. <http://www.koloro.ua>blog/issledovanie sokov...v>
4. Потребление соков в мире yandex.ua/images
5. refdb.ru>book/1731693.html
6. В.Б. Чернозубов, В.Л. Подберезный, Н.К. Токманцев "Техника термического опреснения воды в системах водоподготовки и ликвидации соледержащих промышленных стоков". //Экология и технология. Москва, 1994 г.
7. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
8. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение /А.И. Соколенко, А.И. Украинец, В.Л. Яровой и др.; под ред. А.И. Соколенко. – К.: АртЕк, 2003.- 432с.
9. Гафизов Г. К., Гафизов С. Г. Влияние метода обработки и температуры хранения гранатового сока на сохранность антоцианов // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XLIII междунар. науч.-практ. конф. № 2(39). – Новосибирск: СибАК, 2015.
10. Мамедов Д.Ш. Влияние температуры обработки на стабильность флавоноидов гранатового сока / Д.Ш. Мамедов, Г.К. Гафизов // Аграрная наука Азербайджана. Баку, — 2009. — № 3—4, — с. 137—138.
11. Марх А.Т. Полифенолы гранатов /А.Т. Марх, Т.А. Лысогор // Известия вузов СССР. Пищевая технология. — 1973. — № 2. — с. 36—38.
12. Basu A. Pomegranate juice: a heart-healthy fruit juice. / A. Basu, K. Penuqonda //Nutr. Rev.— 2009. — vol. 67. issue 1. — p. 49—56.
13. Fisher U.A. Kammerer thermal stability of anthocyanins and colourless phenolics in pomegranate (Punica granatum L) juices and model solutions /U.A. Fisher, R. Carle and R. Dietmar // Food Chemistry. — 2013. — vol. 138. — issues 2—3. — p. 1800—1809.
14. Malik A. Pomegranate fruit juice for chemoprevention and chemotherapy of prostate cancer. / Malik A., Afaq F., Sarfara S. [et al.] // Proc Natl Acad Sci USA, — 2005. — vol. 102. issue 41. — p. 108—113.
15. Miguel G. The contraction of anthocyanins in fruits of «Assaria» hmegranate a sweet Portuguese cultivar typically grown in Algarve (south Portugal), was monitored during storage under different conditions / G. Miguel, C. Fontes, Antunes D. [et. Al.] // Biomed Biotechnol. — 2004. — № 5. — p. 338—342.
16. Karnan M. Effects of processing method and storage temperature on clear pomegranate juice turbidity and color hatices /M. Karnan, N. Tetik and I. Turnan // Food Processing and Preservation. — 2013. — vol. 37. — issue 5. — p. 899—906.
17. Zarfeshany A. Potent health effects of pomegranate /A. Zarfeshany, S. Asqary and S.H. Javanmard // Adv Biomed Res., 2014.-3:100. [Elektronik resource] — URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4007340/> (date of treatment 2014.03.25).
18. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М. Химия, 1978.
19. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения/Пер. с англ.: М. Химия, 1981.
20. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
21. Бурдо О.Г., Офатенко О.О. Анализ процессов деминерализации воды //36. наук. праць ОНАХТ Одеса, 2009. – Вип.35. – С. 287- 292.
22. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОАДХОДЖЕННЯ ГЕЛІОПАНЕЛІ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Козін В. М., канд. техн. наук, Винниченко Б. О., студент
Сумський державний університет, м. Суми

ENHANCEMENT OF HEAT SUPPLY HELIOPANELS FOR THE PRODUCTION OF THERMAL ENERGY

V. Kozin, Cand. Tech. Sciences, Vynnychenko B.O., student
Sumy State University, Sumy

Анотація. Стаття присвячена проблемі підвищення теплонадходження геліопанелі, що працює для вироблення теплової енергії. Такі пристрої можуть використовуватися для отримання гарячої води та у системах опалення «тепла підлога». До переваг таких систем треба віднести їх повну автономність, надійність, простоту конструкції, тривалий термін служби та ін. Однак робота геліопанелі повністю залежить від кількості ефективно засвоєної нею теплової енергії сонця, яка, у свою чергу, залежить як від конструкції та властивостей матеріалів панелі, так і від кількості спрямованого сонячного випромінювання, що визначається географічним розташуванням панелі, періодом року, часом доби та геометрією взаємного розміщення площини панелі і напрямом падіння на неї сонячного променя.

Врахування динаміки кута падіння сонячного променя на геліопанель дозволяє суттєво підвищити її теплозасвоєння та збільшити тривалість сонячного опромінення, а отже, – покращити енергетичну ефективність альтернативного джерела теплової енергії, що особливо актуально при розміщенні панелі у північній та центральній частинах країни, які відносять до четвертої зони з найменшим середньорічним сонячним випромінюванням до $1000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$.

Abstract. Currently acute problem of energy due to the constant growth of tariffs for energy: water, electricity and heat. The situation was reinforced by the lack of sufficient amount of domestic reserves of natural gas, coal and other minerals – energy sources which used in traditional energetics. Therefore, the growing demand for energy in its various forms significantly accelerates the introduction of devices and systems that operate from alternative and renewable sources. This area is developing very actively, but as with all things new, these devices still have a relatively low efficiency.

The article deals with the problem of increase efficiency of solar battery, working to receive of heat energy. These devices can be used for hot water and heating in a "warm floor" systems. The advantages of such systems are full autonomy, reliability, simplicity of design, long life and so on. The action of solar battery depends on solar heat, which effectively completely absorbed by panel. It is depends on the design and properties panels, and on the number of directional solar radiation and it is determined by geographical location of panel, season, time of day and geometry relative placement between panel plane and the direction of fall sunlight.

Taking into account the dynamics of the angle of incidence of sunlight on solar battery to significantly increase its heat absorption and increase the time of the solar radiation, and thus – to improve the energy efficiency of an alternative source of heat. It is especially important when placing panels in the northern and central parts of the country what belongs to the fourth zone with the lowest average annual solar radiation up to $1000 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$.

The use of a turning mechanism by analogy with solar panels working for the generation of electric energy, will allow in dynamic mode during the day to maintain a normal or close to its angle of incidence of sunlight. This will help to maximize the heat production efficiency of solar energy and increase the output power of the solar station. However, the use of a turning mechanism will make it impossible to install solar panels on the sloping roofs of buildings, as can be seen now. Such systems will require free horizontal areas, a strong foundation and additional pay of money, but the growth of heat energy production in the remote time will allow to return part of money by the introduction of this energy efficient measure.

Keywords: solar panel, solar energy, energy efficiency, alternative energy source, heat supply system, solar radiation, panel orientation, heat transfer.

Ключові слова: геліопанель, сонячна енергетика, енергоефективність, альтернативне джерело енергії, система теплопостачання, сонячна радіація, орієнтація панелі, теплонадходження.

Більшість геліостанцій працюють для вироблення електричної енергії, однак енергію Сонця можна використовувати і для вироблення теплової енергії. У цьому випадку променева енергія йде на нагрівання теплоносія, що циркулює у каналах панелі, а отримане тепло акумулюється у теплоізолюваному баці-акумуляторі. Кількість сприйнятої панеллю теплової енергії залежить від багатьох факторів: конструкції та властивостей матеріалів панелі, кількості спрямованого сонячного випромінювання, що визначається

географічним розташуванням панелі, періодом року, часом доби та геометрією взаємного розміщення площини панелі і напрямом падіння на неї сонячного променя. Якщо для сонячних панелей, що працюють для вироблення електричної енергії, вже розроблено спеціальні механізми, які дозволяють повертати її за Сонцем, то геліопанелі, що працюють для вироблення тепла, встановлюють стаціонарно з орієнтацією на південь та кутом панелі до горизонту близько 40° [1 – 5]. Такий підхід зменшує початкові капітальні витрати так скорочує термін монтажу, однак призводить до суттєвого зменшення ефективності теплосасвоєння геліопанелі через не коректний кут падіння променів на площину панелі, а також впливає на скорочення тривалості контакту сонячного проміння з панеллю. Отже, стаття присвячена актуальному питанню та дозволяє оцінити втрачений ефект від не використання поворотних механізмів у геліопанелях, що працюють для вироблення тепла на прикладі їх територіального розміщення у м. Суми.

Кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню Землі, дуже залежить від широти місцевості (див. рис. 1). Відношення середньомісячних надходжень сонячної радіації у червні і грудні зі збільшенням широти зростає, і на широті 50° пн. ш. воно приблизно дорівнює 13. Ще більше відрізняється надходження сонячної енергії у найсприятливіший і найнесприятливий дні року, при цьому відношення $E_{\max}$ і $E_{\min}$ може досягати 50. Ці дані свідчать про великі зміни протягом року кількості надходження сонячної енергії, а отже, і про подібні зміни теплопродуктивності геліосистеми [8].

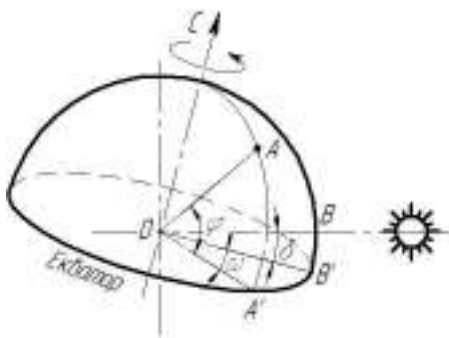


Рис. 1. Схема удаваного руху Сонця по небосхилу

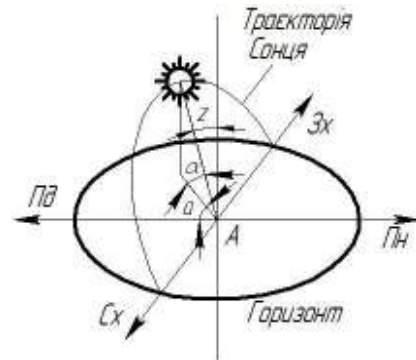


Рис. 2. Кути, які визначають положення точки A на земній поверхні відносно сонячних променів

Для розрахунку наявної кількості сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню, необхідно знати кути падіння сонячних променів на похилу і горизонтальну поверхню у даному місці. Положення деякої точки A на земній поверхні відносно сонячних променів у даний момент часу визначається трьома основними кутами: широтою місця розташування точки φ , годинним кутом ω та схиленням Сонця δ (рис. 1). Разом з трьома основними кутами φ , ω та δ у розрахунках сонячної радіації використовують також зенітний кут z , кут висоти α і азимут a Сонця (рис. 2) [7].

Схилення Сонця у довільний день року визначається за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (1)$$

де n – порядковий номер дня, відрахований від 1 січня.

Для розрахунків величину n беруть як порядковий номер середнього розрахункового дня місяця року.

Кут падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню, що має азимут a_n і кут нахилу до горизонту β , визначається за формулою:

$$\cos i = \sin \beta \left[\cos \delta (\sin \varphi \cos a_n \cos \omega + \sin a_n \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos a_n \right] + \cos \beta [\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi], \quad (2)$$

де φ – широта місцевості; δ – схилення Сонця; ω – годинний кут Сонця.

Азимут вертикальної поверхні a_n в тому випадку, якщо вона орієнтована на південь, дорівнює 0° , на захід 90° , на схід -90° , на північ 180° .

Середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню сонячного колектора, визначається за формулою:

$$E_n = RE, \quad (3)$$

де E – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню, $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$; R – відношення середньомісячних денних кількостей сонячної радіації, що надходить на похилу і горизонтальну поверхні.

Коефіцієнт перерахунку кількості сонячної енергії з горизонтальної поверхні на похилу поверхню сонячного колектора з південною орієнтацією дорівнює сумі трьох складових, які відповідають прямому,

розсіяному та відображеному сонячному випромінюванню:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_n + \frac{E_p}{E} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (4)$$

де E_p – середньомісячна денна кількість розсіяного сонячного випромінювання, яке надходить на горизонтальну поверхню, $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$; E_p / E – середньомісячна денна частка розсіяного сонячного випромінювання; R_n – середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню; β – кут нахилу поверхні сонячного колектора до горизонту; ρ – коефіцієнт віддзеркалення (альbedo) поверхні Землі та оточуючих тіл, який як правило беруть таким, що дорівнює 0,7 для зими та 0,2 для літа; у весняні та осінні місяці цей коефіцієнт беруть таким, що дорівнює 0,45.

Величини E_p та E беруть з довідкової літератури, наприклад, [9].

Середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню з південною орієнтацією знаходять з виразу

$$R_n = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_{z,n} + \frac{\pi}{180} \omega_{z,n} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_z + \frac{\pi}{180} \omega_z \sin \varphi \sin \delta}. \quad (5)$$

Годинний кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної поверхні

$$\omega_z = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta). \quad (6)$$

Як годинний кут заходу Сонця для похилої поверхні з південною орієнтацією беруть меншу з двох величин: ω_z або величину $\omega_{z,n}$, розраховану за формулою:

$$\omega_{z,n} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta]. \quad (7)$$

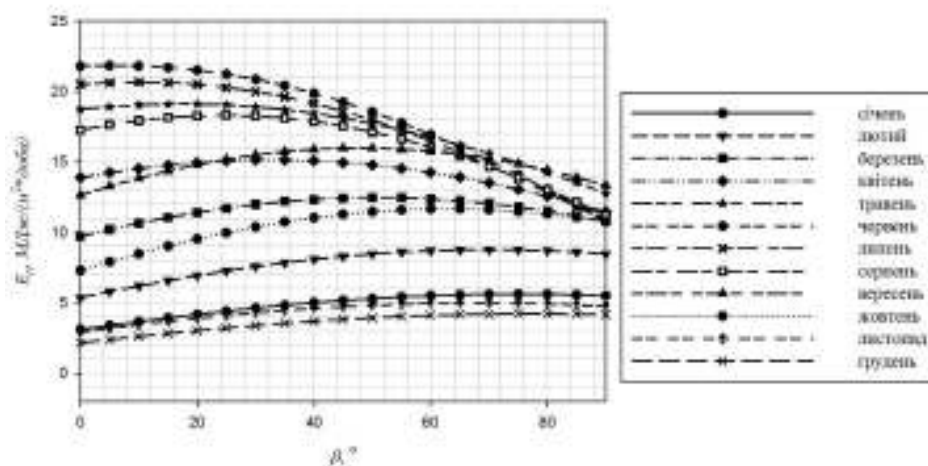


Рис. 3. Вплив кута нахилу геліопанелі до горизонту

З метою виявлення впливу повертання геліопанелі за напрямками горизонту, введемо коефіцієнт теплонадходження геліопанелі, який дозволить кількісно оцінити зростання теплонадходження панелі за поворотом її повороту на кут ω відносно півдня:

$$k_\omega = \frac{E_\omega}{E_{\omega=0}}, \quad (8)$$

де E_ω – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на поверну на деякий кут азимуту α панель при оптимальному куті нахилу $\beta_{\text{опт}}$ $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$; $E_{\omega=0}$ – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на південно орієнтовану ($\omega = 0^\circ$) панель при оптимальному куті її нахилу $\beta_{\text{опт}}$ $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$.

Використовуючи формули (1), (3) – (7), для кожного місяця року було виконано розрахунки середньомісячної фактичної добової сумарної кількості сонячної енергії залежно від кута нахилу геліопанелі β . Результати розрахунків наведені на рис. 3.

Як бачимо з рис. 3 для кожного місяця існує власний оптимальний кут нахилу геліопанелі, який змінюється від $\beta_{\text{опт}} = 5^\circ$ для червня до $\beta_{\text{опт}} = 75^\circ$ для січня. Отже, робимо висновок, що для кожного місяця

протягом року необхідно встановлювати власний кут нахилу геліопанелі, який зменшується навесні та зростає восени.

Кількісна залежність кута β та відповідний йому максимум випромінюваної сонячної енергії для $50^{\circ}47'$ пн. ш, що відповідає широті розміщення м. Суми, протягом року подані на рис. 4.

З метою оцінювання відносної величини теплонадходження геліопанелі за рахунок його повертання до горизонту відносно рекомендованого значення $\beta = 40^{\circ}$, використовуючи формули (1), (3) – (7), було виконано порівняльні розрахунки, результати яких наведені на рис. 5.

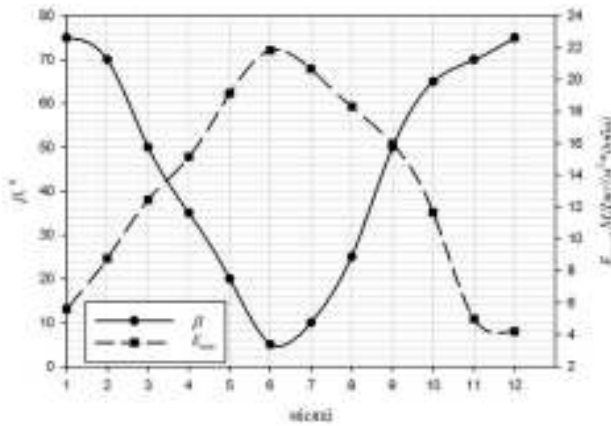


Рис. 4. Оптимальний кут нахилу геліопанелі до горизонту $\beta_{\text{опт}}$ та максимуми випромінюваної сонячної енергії E_{max} для м. Суми

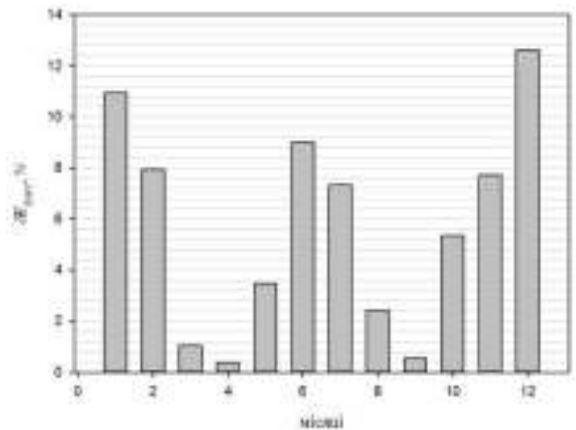


Рис. 5. Відносне зростання теплонадходження геліопанелі протягом року за рахунок його повертання до горизонту на оптимальний кут $\beta_{\text{опт}}$ порівняно з $\beta = 40^{\circ}$

Як видно з рис. 5, найбільше покращення теплонадходження геліопанелі за рахунок зміни його орієнтації до горизонту спостерігається у найхолодніший та найтепліший місяці року.

Ефективність теплонадходження геліопанелі залежить від кута, утвореного напрямом сонячного променя та нормалі, яка виходить з площини геліопанелі. Цей кут при розрахунках оцінюють за формулою (2). Найоптимальніший кут падіння сонячних променів буде коли ці напрями повністю співпадуть, тобто коли кут $i = 0^{\circ}$, що відповідає значенню $\cos i = 1$.

Використовуючи зазначені вище формули був виконаний варіантний розрахунок величини $\cos i$ для кожного місяця року та часу доби, починаючи зі сходу сонця, до його заходу для отриманих вище оптимальних значень кута нахилу панелі $\beta_{\text{опт}}$. Кут повороту ω варіантно обирався із діапазону $\omega \in [-180^{\circ}; 180^{\circ}]$. Причому кут $\omega = 0^{\circ}$ відповідав спрямуванню панелі на південь, а кути $\omega = -90^{\circ}$ – на схід, $\omega = 90^{\circ}$ – на захід.

У результаті розрахунку, використовуючи формулу (2), було отримано максимальні значення коефіцієнта $\cos i$ протягом доби для усіх місяців року (рис. 6).

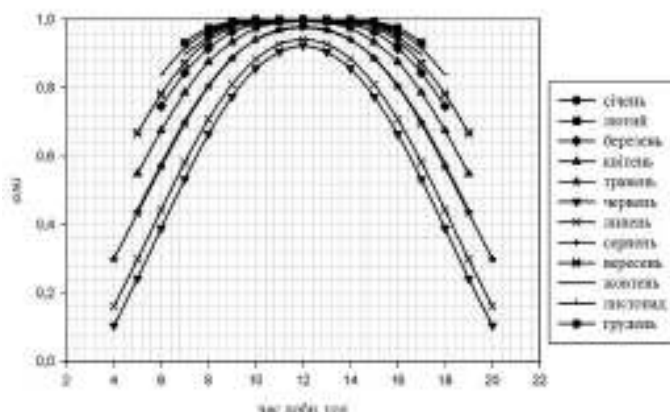


Рис. 6. Максимальні значення коефіцієнта $\cos i$ протягом доби для усіх місяців року

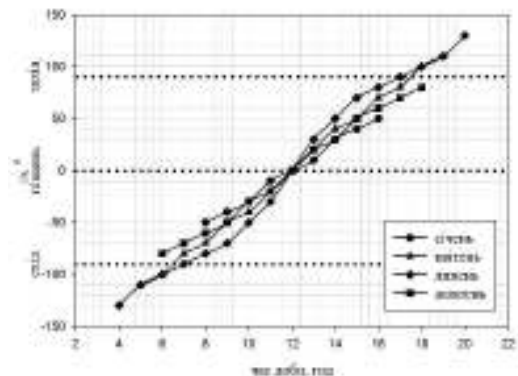


Рис. 7. Порівняльний вплив кута повороту геліопанелі відносно сторін горизонту для різних пір року

Як бачимо з рис. 6, найкраще співпадіння напрямку сонячних променів та нормалі геліопанелі спостерігається взимку. Це можна пояснити низьким схиленням Сонця та короткою тривалістю світлового дня.

На рис. 7 можемо спостерігати динаміку зміни кута повороту геліопанелі відносно сторін горизонту для різних пір року: повертання геліопанелі протягом доби симетричне відносно полудня коли для всіх пір року геліопанель спрямовується на південь. Найбільша швидкість повертання геліопанелі, тобто зміна кута ω протягом доби спостерігається у літні місяці, а найменша – взимку.

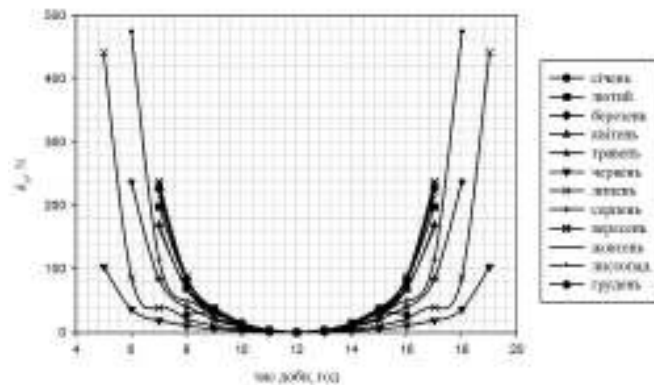


Рис. 8. Збільшення теплонадходження за рахунок повороту панелі відносно сторін горизонту протягом доби для всіх місяців року

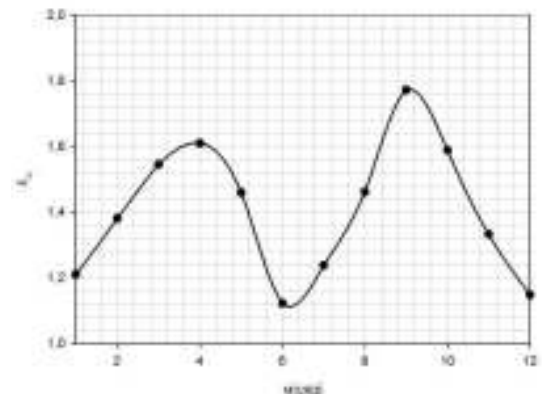


Рис. 9. Зміна середньомісячного коефіцієнта теплонадходження геліопанелі при її повороті відносно сторін горизонту за місяцями

Аналізуючи результати розрахунків коефіцієнта теплонадходження k_0 , які показані на рис. 8 та 9, можемо зробити висновки, що найбільше зростання теплонадходження від повороту панелі відносно сторін горизонту (до 4,5 разів) спостерігається вранці та ввечері особливо у літні місяці та найбільш ефективним є використання повороту панелі відносно сторін горизонту буде навесні та восени.

Висновки

Після виконання розрахункових досліджень за поданими у роботі залежностями було отримано такі основні результати:

- 1) для кожного місяця існує власний оптимальний кут нахилу геліопанелі, який змінюється від $\beta = 5^\circ$ для червня до $\beta = 75^\circ$ для січня;
- 2) найбільше покращення теплонадходження геліопанелі за рахунок зміни її орієнтації до горизонту спостерігається у січні та липні; найменший вплив кута β спостерігається у весняні та осінні місяці;
- 3) для всіх пір року, окрім зими, максимальний поворот геліопанелі у години сходу та заходу сонця перевищує 90° , тобто панель необхідно повернути не тільки на схід при сході сонця, але ще й частково на північ;
- 4) найбільша швидкість повороту геліопанелі відносно сторін горизонту спостерігається у літні місяці, найменша – взимку;
- 5) найбільший ефект від використання повороту панелі відносно сторін горизонту спостерігається навесні та восени (до 1,78 рази), вранці і увечері – до 4,5 разів;
- 6) завдяки повороту геліопанелі відносно сторін горизонту збільшується тривалість її роботи: у березні, квітні, липні, червні, серпні, вересні на 2 години (по годині ввечері та зранку), а у травні на 4 години (по дві години під час сходу та заходу сонця).

Отже, можемо зробити загальний висновок, що з метою збільшення загального теплонадходження геліопанелі протягом року необхідно динамічно змінювати її орієнтацію шляхом зміни нахилу та повороту за сторонами горизонту. Найбільший ефект досягається при повороті за сторонами горизонту.

Література

- 1 Thermotech. Солнечное теплоснабжение: техническое пособие. [Текст] — Киев: Thermotech Vostok, 2011. — 26 с.
- 2 Vaillant. Проектирование гелиосистем. [Текст] — Киев: Vaillant, 2008. — 35 с.
- 3 Viessmann. Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения [Текст]. — Киев: Злато-Граф, 2010. — 194 с.
- 4 Junkers. Гелиотермотехника. Тетрадь проектанта. [Текст] — Киев: Юнкерс, 2007. — 204 с.
- 5 Дрексель, Р. Сооружение солнечных коллекторов для горячей воды. Практическое руководство [Текст] / Р. Дрексель, Р. Гамисония. — Киев: WECF, 2010. — 28 с.
- 6 Четошникова, Л. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учебное пособие [Текст] / Л. М. Четошникова. — Челябинск: ЮУрГУ, 2010. — 69 с.

- 7 Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки [Текст] / Н. В. Харченко. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 208 с.: ил.
- 8 Харченко, Н. В. Системы гелиотеплоснабжения и методика их расчета [Текст] / Н. В. Харченко, В. А. Никифоров. — Киев: Знание, 1987. — 240 с.
- 9 Справочник по климату СССР. В 34-х вып. / Вып. 10. Украинская ССР. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние [Текст] / Под ред. В. И. Гришко, Л. И. Мисюра. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 124 с.

УДК 69.047.7:844.95

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМ ПІДПРИЄМСТВОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Книш О.І. канд. техн. наук, доцент, Беспалова А.В. канд. техн. наук, доцент,
Дашковська О.П. канд. техн. наук, доцент, Файзуліна О.А. канд. техн. наук, доцент
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

IMPROVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS CONSTRUCTION ENTERPRISE WITH THE USE OF ENERGY EFFICIENCY INDICATORS

Knysh O.I. Cand. Tech. Sciences, associate professor, Bepalova AV Cand. Tech. Sciences,
associate professor, Dashkovskaya O.P. Cand. Tech. Sciences, associate professor,
Fayzulina O.A. Cand. Tech. Sciences, Associate Professor
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa

Анотація. Розглянуто показники оцінки ефективності використання засобів механізації будівельного підприємства. Для регулювання надійності в будівельному виробництві, підвищення ефективності використання споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) необхідно впорядкувати будь який з варіантів експлуатації машин згідно комплексу економічних оцінок та дослідження методів організації ресурсів. Основною метою є встановлення планової міри споживання енергоресурсів при виконанні будівельно-монтажних робіт. При організації обліку ресурсів застосовано інтегральний механізм за розподільче-визначною схемою перерозподілу навантажень та обсягів роботи. Диференціація обсягів роботи встановлює відучи технічні системи та дозволяє авторові проекту втручатись у схему розподілу навантажень робочого дня між машинами, що задіяні у споріднених робочих процесах. Встановлено режим примусового відбору ресурсної бази будівельного виробництва, що дозволяє чіткіше визначитись із операційним часом ведучих засобів механізації, та забезпечуючих їх роботу ділянкових систем технічного сервісу підприємства. В окремий сектор викреслені методики та системи відбору енергетичних ресурсів з можливістю подальшої корекції режимів споживання ПЕР у типових проектах ведення робіт будівельного господарства. Досліджено питання взаємної відповідності режимів виконання робіт у складі календарного плану з технічними параметрами, що характеризують енергоефективність та надійність машин. Відтворені залежності коефіцієнту використання засобів механізації, при яких експлуатація системи механізації є доцільною з позиції управління якістю. Окремо поставлене питання про доцільність використання робочої сили у складі ділянки. Проаналізовано робочий час бригад та ділянок, запропонована схема оптимізації використання робочої сили на оперативних фронтах робіт та вузлах забезпечення робіт. Розроблені часові схеми «робота-відпочинок» при організації підготовчих робіт наступних черг будівельного виробництва. Запропоновані оптимізаційні моделі використання робочого часу на об'єкті. Запропоновані моделі узгоджуються з основними на резервними силами об'єктового та територіального призначення будівельного господарства. Моделі споживання ПЕР розповсюджуються на новозбудовані та реконструйовані будівельні системи.

Abstract. The performance evaluation of efficiency of the use of mechanization means a construction company. For adjustment of reliability in the construction industry, enhance the efficiency of consumption of fuel and energy resources (FER) must be sort any of these options are operating under complex economic evaluations and research methods of resources. The main goal is surplus-appropriation of proportion of energy resources consumption in carrying out construction and installation works. During organization of resources applied integrated mechanism dispatch-prominent scheme of redistribution of loadings and amount of work. Differentiation of the amount of work sets providing technical systems and allows the author of interference in the scheme of distribution of loads working

day between cars, which are engaged in cognate working processes. The mode is set to forced selection of resource base of building production, allowing more clearly identify operational time leading mechanization means, managment and their workshop systems of technical service enterprise. In a separate sector annihilated methods and system of energy resources with the possibility of further adjustment modes FER consumption in model projects of work of the construction industry. The issue of mutual correspondence regimes of works in the calendar plan of technical parameters that characterise the energy efficiency and reliability machines. Reproduced depending on the use of mechanization means, in which the system operation mechanization advisable from the point of view of quality management. Separately, a question of expediency of use of labor in the area. Analysis of working time brigades and land, the proposed scheme optimizing the use of labor force at the operational areas and nodes support of works. Designed time scheme "robot rest during" organization preparatory work next phases building work. The proposed optimal regimes of working time on the account. Proposed comply with the key on the reserve forces of local and territorial purpose of construction industry. Consumption patterns FER apply to all building systems.

Ключові слова: система засобів механізації, будівельне підприємство, інтервали планово-попереджувальних заходів, безвідмовна робота, енергетична надійність виробництва, ритм енергоресурсів.

Keywords: system mechanization construction company, the intervals scheduled preventive measures, faultless work, energy reliability production rhythm of energy.

Вступ. В реальних умовах при виробництві будівельних робіт одночасно можуть використовуватися різні види ПЕР: дизпаливо, бензин, гас, зріджений газ, електроенергія, теплова енергія та ін. Для обліку загальної кількості енергоресурсів норму витрат ПЕР пропонується висловлювати в кількості умовного палива (у. п.) , віднесеного до вимірника продукції. В якості вимірювача продукції може бути кількість виробленої продукції (роботи), виражене в конкретних фізичних одиницях, наприклад: м², м³, м, шт., кг, л і т. п. Однак найбільш зручно в якості вимірювача використовувати умовну величину - одиницю відновлювання засобів механізації при організації будівельно-монтажних робіт. Аспекти експлуатації засобів механізації та раціональної організації функціонування системи засобів механізації (СЗМ) висвітлені в роботах відомих вчених в області організації і технології будівельного виробництва: Атаєва С.С., Афанасьєва В.О., Балицького В.С., Гончаренко Д.Ф., Друкованого М.Ф., Ушацького С.А., Черненко В.К., та ін., а в області механізації і автоматизації будівельних процесів - Вознесенського В.А., Кудрявцева Е.М., Менеїлюка О.І., Землякова Г.В., а також у роботах ряду інших вітчизняних і закордонних вчених. Пошук аналітичних моделей, розробці методів та алгоритмів розробці методів та алгоритмів раціоналізації та оптимізації парків машин і механізмів присвячені роботи Ю.І. Білякова, В.О. Поколенка, В.К. Черненко, Г.В. Лагутіна, О.А. Тугая, О.А. Лозовського, В.І. Доненка та ін.

Метою дослідження є розробка сучасних науково-теоретичних моделей організації оптимальних систем засобів механізації будівельних підприємств з урахуванням впливу якості використання паливно-енергетичних ресурсів виробництва.

Методи дослідження. При проведенні досліджень, існуючі форми організації експлуатації засобів механізації було умовно розділено на три основні типи:

- засоби механізації, що перебувають на балансі загальнобудівельних підприємств та організацій (ЗМБП);
- засоби механізації, сконцентровані в спеціалізованих підрозділах -дільницях (управліннях) механізації (ЗМСП);
- засоби механізації, що частково передані дільницям (управлінням) механізації, а частково залишилися на балансі загальнобудівельних підприємств та організацій (ЗМП).

При обчисленні якості використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) виробництва враховувались як системи поточного транспортування ПЕР, так локального складування в межах робочої дільниці. Досліди розширювались не тільки на експлуатаційну об'єктову частину, а й охоплювали сервісні центри обслуговування ЗМ [1]. Наскрізнi витрати що пов'язані із відновленням, відшкодуванням, сортуванням та транспортуванням збірних одиниць, матеріалів укріплювались в межах об'єктового кошторису.

Було встановлено, що будь який з варіантів експлуатації машин вимагає економічної оцінки та дослідження методів організації використання ПЕР. Розглянуто показники оцінки ефективності використання ЗМ будівельного підприємства (БП). Досліджено питання взаємної відповідності режимів виконання робіт у складі календарного плану з технічними параметрами, що характеризують працездатність ЗМ та залежності визначення коефіцієнта енергоефективності ЗМ, при яких експлуатація СЗМ БП є доцільною з позиції управління якістю [2].

Для математичної формалізації зазначених моделей припустимо, що кожен ЗМ в змозі пропрацювати деякий час до тих пір, поки значення енергоефективності залишаються адекватними в іншому випадку виникає необхідність у сервісному обслуговуванні та ремонті. Кількість, ефективних і неефективних ЗМ визначає в кожен момент часу стан усієї СЗМ БП, та стає запорукою резервування ПЕР, тобто енергонадійністю ЗМ [2].

Під енергонадійністю ЗМ маємо на увазі здатність її виконувати поставлене перед нею завдання з початковим рівнем енерговитрат, тобто мати у наявності необхідну кількість ефективних (працездатних) ЗМ [1]. Порушення останньої умови робить непрацездатною усю СЗМ. Розглянемо можливі випадки надійності СЗМ БП у залежності від особливостей її побудови.

Узагальнена підсумкова модель визначення надійності СЗМ та організації її оптимального обслуговування для довільної стратегії включатиме наступні дії:

- 1) Визначення матриці перехідної імовірності;
- 2) Вирішення системи рівнянь;
- 3) Визначення середнього ефекту за період;
- 4) Визначення середньої тривалості періоду;
- 5) Встановлення цільових функцій періоду;
- 6) Визначення оптимальної точки періоду.

Отримана система ідентифікації надійності СЗМ БП для випадків відновлених та невідновлених станів дозволяє перейти до розробки алгоритмів застосування та обслуговування ЗМ з урахуванням діючої структури БП, його ресурсного забезпечення та впливу зовнішніх умов виробництва [2].

Розглянемо деякі алгоритми базового функціонування підприємства із накладанням впливу факторів із застосуванням комп'ютерного управління ресурсними базами.

Результати досліджень. В якості модельного об'єкту було прийнято виробництво фондового будівельного призначення із встановленим штатним складом механізації 37%, та відновлювальними ресурсами об'єктового типу з показником ресурсовіддачі не менш 90% (Таблиця 1-3). Всі інші виробничі втрати компенсуються за рахунок довготермінового лізингу та аутсорсингу послуг та ресурсів. Процесний вплив цих явищ невеликий, через те результатами їх загальної дії можна знехтувати. Таким чином початкова надійність СЗМ БП знаходилась на рівні 37% , а автономність функціонування систем ЗМ знаходилась на рівні не менш 85-90 %. Ресурсному аналізу підлягали рухомі відновлювальні дільниці (Таблиця 4). Методика обчислення ресурсів ЗМ та СЗМ БП проводилась автоматизованим шляхом на базі розробок програмного забезпечення ОДАБА, та з використанням матеріалів лабораторії Г. Землякова (БНТУ, Білорусь). В якості провідних ресурсних ЗМ об'єкту вибрані: бульдозер (планувальник), екскаватор (Таблиця 1), кран стріловий, автоміксер безперервного циклу (Таблиця 3) та СЗМ ЗМ оперативного обслуговування типу ПАРМ-1М з модернізованим пусковим пристроєм та автономним електрогенеруючим обладнанням (Таблиця 4). Виробництво регламентоване, монтажні ділянки, зовнішні системи водопостачання, електропостачання та зв'язку знаходились в зоні кошторису проекту.

Додаткові девелоперські проекти, узгоджувальні права інших користувачів документи генеральним проектом не передбачені. Вільні кошти, рухомість розподілялись згідно укладеного переліку документів початкового характеру. Земля фондового об'єкту знаходиться у власності міської громади та не потребує додаткових межових угод кадастрового характеру. Режим роботи транспортних мереж повністю забезпечує потреби забудовника. Електричні мережі забезпечують виробничі потреби згідно добового графіку енергопостачання та водопостачання. Додаткових накопичувальних станцій паливно-мастильних матеріалів проектом не передбачено. Сміття, бруд, відходи виробництва частково утилізувались згідно проектною документації початкового характеру. Загальний утилізаційний об'єм протягом дослідів не перевищував ліміти проекту та становив 8% обсягу внутрішнього виробництва. Утилізаційні резерви переважно виробничого характеру та здатні забезпечити матеріальні потреби субпідрядників та уповноважених осіб. Всі резерви об'єкту забезпечуються як власними силами підрядників, субпідрядників так і осіб, що означені початковою угодою проекту. Ресурсний вплив інших виробників відстежувався на рівні технічного нагляду, а координація дій внутрішніх потужностей знаходилась в зоні дії диспетчерської служби підприємства. В зоні дії останньої залишались як матеріальні так і кадрові потоки. Вахтова система організації руху робітничого складу домінує над конвеєрною через незначний обсяг виробництва, рівень спеціалізації бригад становить не менше 42 %. Кваліфікаційний склад бригад комбінованого типу із залученням спеціалістів інженерно-технічного персоналу суміжних підрядних організацій що дозволяє вести оперативно - відновлювальні роботи (ОВР) у складі проектних груп[3].

Таблиця 1. Ресурсна готовність екскаватора типу ЭО-3323А

Об'єкт		Житловий дім на десять квартир			Підрядник
№	Дата спостереження	Час спостереження			
		Зміна	Початок	Закінчення	Тривалість
4	12.09.2016	1	9:00	17:00	7,5 год
Вид робіт				Об'єм робіт	Вартість робіт

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розробка ґрунту в «отвал»				168		м³	306,9	ОВР
Вид витрати ТЭР			Технологічні потреби					
			Земляні роботи					
Енергоспоживач			Час робот и	Кількість ПЕР			Примітка	
Одноковшовий екскаватор із зворотною лопатою				№				
				Одиниці вимірювання				
ЭО 3323А			час	кг.	кг. ум . п.	%		
Виробничі витрати	При повному навантаженню		2,55	9,48	13,75	37,4		
	При не повному навантаженню		0,55	1,95	4,1	7,7		
	При роботі без навантаження		3,1	10,8	15,66	42,6		
	Разом ::		6,2	22,23	33,51	87,6		
Втрати	Лишня робота		1,55	2,79	4,045	11		
	Непередбачені роботи		0,1	0,356	0,516	1,4		
	Разом :		1,65	3,14	4,56	12,4		
Всього:			5,81	7,85	25,4	100,0		
Питомі витрати ПЕР							0,124	кг.ум .п.

Таблиця 2. Ресурсна готовність бульдозера типу ДЗ – 42Г

Об'єкт		Житловий дім на десять квартир				Підрядник	
№	Дата спостереження	Час спостереження					
		Зміна	Початок	Закінчення		Тривалість	
6	13.09.2016	1	8:00	15:00		7,5 год	
Вид робіт			Об'єм робіт			Вартість робіт	
Зворотна засипка котловану			450		м³	158,7	ОВР
Вид витрат ПЕР		Технологічні потреби					
		Земляні роботи					
Енергоспоживач			Час роботи	Кількість ПЭР		Примітка	
Бульдозер-планувальник				№			
			Одиниці вимірювання				
ДЗ-42Г			час	кг.	кг. ум . п.	%	
Виробні витрати	При повному навантаженню		1,73	12,49	18,11	33,09	
	При не повному навантаженню		0,35	2,53	3,67	6,71	
	При роботі без навантаження		2,08	15,02	15,66	28,6	
	Разом :		4,16	30,04	37,44	68,4	
Втрати	лишня робота		1,55	11,2	16,24	29,7	
	Непередбачені роботи		0,1	0,722	1,047	1,9	
	Разом :		1,65	11,92	17,29	31,6	
Всього:			5,81	41,96	54,73	100	
Питомі витрати ПЕР						0,345	кг.ум.п.

Таблиця 3. Ресурсна готовність автомобільного бетонозмішувача IVECO-Trakker 380

Об'єкт		Житловий дім на десять квартир			Підрядник	
№	Дата спостереження	Час спостереження				
		Зміна	Поч	Закінчення		Тривалість

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

			аток				
6	13.09.2016	1	8:00	15:00	7,5 год		
Вид робіт			Об'єм робіт		Вартість робіт		
Бетонування фундаменту та колонної основи			168	м³	124,2	ОВР	
Вид витрат ПЕР		Технологічні потреби					
		Бетонні роботи					
Енергоспоживач			Час робот и	Кількість ПЕР		Примітка	
Автомобільний бетонозмішувач				№			
			Одиниці вимірювання				
IVECO-Trakker 380			час	кг.	кг. умов . п.		%
Виробниче навантаження	При повному навантаженню		4,27	26,4	38,28	67,4	
	При не повному навантаженню		0,82	5,077	7,36	12,97	
	При роботі без навантаження		0,95	5,88	8,53	15,03	
	Разом :		6,04	37,36	54,17	95,4	
Витрати	Лишня робота		0,18	1,11	1,61	2,84	
	Непередбачувана робота		0,1	0,66	0,95	1,76	
	Разом :		0,28	1,77	2,56	4,6	
Всього:			6,32	39,13	56,75	100	
Питомі витрати ПЕР					0,457	кг ум .п.	

Таблиця 4. Ресурсна готовність ділянки оперативного обслуговування ПАРМ-1М

Об'єкт		Житловий дім на десять квартир			Підрядник	
№	Дата спостереження	Час спостереження				
		Зміна	Початок	Закінчення	Тривалість	
5	13.09.2016	1	9:00	17:00	7,5 год	
Вид робіт			Об'єм робіт		Вартість робіт	
Технічний сервіс обладнання			168	м³	306,9	ОВР
Вид витрат ПЕР		Технологічні потреби				
		Слюсарні роботи				
Енергоспоживач		Час роботи	Кількість ПЕР			Примітка
Ділянка оперативного обслуговування СМ			№			
		Одиниці вимірювання				
ПАРМ-1М		час	кг.	кг. умов . п.	%	
Виробничі витрати	При повному навантаженню	1,73	1,62	13,75	37,4	Розподіл навантаження ОВР ведеться по умовній ділянці ЭО-3323А, тимчасові одиниці відповідають резерву "електроенергія"
	При не повному навантаженню	0,35	0,504	4,1	7,7	
	При роботі без навантаження	2,08	1,92	15,66	42,6	
	Разом :	4,16	4,044	33,51	87,6	
Втрати	Лишня робота	1,55	0,497	4,045	11	
	Непередбачені роботи	0,1	0,063	0,516	1,4	
	Разом :	1,65	0,56	4,56	12,4	
Всього:		5,81	4,604	38,07	100	

Питомі витрати ПЕР	0,124	кг.ум.п.

Узагальнення результатів. Згідно дослідним даним (Таблиця 4) максимальний операційний час обслуговування СЗМ - 5,81 години не перевищує змінну потребу на локальній ділянці - 7,5 години. Після обстеження інших ланцюгів СЗМ БП відтворюється загальнооб'єктова стратегія технічного сервісу ЗМ.

Оптимізація показників ефективності експлуатації СЗМ в процесі виконання будівельних робіт здійснюється шляхом визначення максимального значення коефіцієнта готовності усіх типів систем з відповідним оптимальним періодом огляду [3].

На завершальному етапі дослідження було сформовано методику обґрунтування способів забезпечення реалізації будівельних проектів та діяльності будівельних підприємств засобами механізації, яка дозволяє враховувати амортизаційну політику будівельного підприємства. Проаналізовано витрати на механізацію БМР за рахунок лізингу і при здачі частини обсягу робіт в субпідряд[4]. В якості критеріїв обрано низку економічних характеристик забезпечення реалізації будівельних підприємств та проектів засобами механізації. Остаточний вибір критерію ефективності визначається на БП окремою задачею[5,6].

Висновки. Практичне використання розроблених за отриманими результатами дослідження програмних рішень, виявило помітний ефект від сполучення запропонованих організаційних заходів.

Результати впровадження розроблених моделей, методик та проектних рішень в практику організації будівництва підприємств Миколаївського регіону довело актуальність, наукову та практичну цінність дослідження.

На основі математичного моделювання організаційно-управлінських процесів ресурсно-календарного забезпечення будівельного виробництва з урахуванням технологічних показників експлуатації систем засобів механізації отримано науково-теоретичні моделі організації технічної складової діяльності БП у вигляді керованих технічних процесів з урахуванням впливу умов виробництва та зовнішніх факторів.

Література

1. Кулік М.В. Моделювання організаційно-технологічних параметрів раціонального використання систем механізації / М.В. Кулік // Містобудування та територіальне планування: Зб. наук. праць. - К.: КНУБА, 2012.- №46. - С.309-315.
2. Кулік М.В. Оновлення методики визначення ефективності використання засобів механізації в будівництві / М.В. Кулік // Будівельне виробництво: міжвідомчий науково -технічний збірник. - К.: НДІБВ, 2012. - №53. - С. 32-36.
3. Бильченко, А. В. Мультиперспективные модели процесса эксплуатации мостовых сооружений [Текст] / А. В. Бильченко, А. Г. Кислов. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 6. – С. 14–17.
4. Лобакова, Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.23.08 / Лобакова Лілія В'ячеславівна. – Одеса, 2016. – 21 с.
5. Менейлюк, А. И. Разработка алгоритма численной оптимизации проектов строительства и реконструкции инженерных сооружений [Текст] /А. И. Менейлюк, А. Л. Никифоров, И. А. Менейлюк // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 8. – С. 72-79.
6. Пшінько, О. М. Логістичні системи функціонування будівельного виробництва на основі підтримки єдності моделюючих умов [Текст] / О. М. Пшінько, І. Д. Павлов, І. А. Арутюнян. //Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика.– 2012. – Вип. 1. – С. 82–87.

УДК.664.653.122.; 664.653.124.

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ

Янаков В.П. канд. техн. наук.

Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь.

ANALYSIS OF EFFICIENCY AND ITS IMPROVEMENT DURING THE DOUGH MAKING PROCESS

Аннотация — стаття зв'язана з проблемою підвищення ефективності процесів тестоприготування. В роботі изучені і освіщені дослідження: взаємозв'язи складових тестоприготування, застосування термінології технологій замісу, алгоритм структури досліджень, етапи інтенсифікації тестоприготування, взаємозв'язь технологій і обладнання, система рівнянь ефективності застосування нових підходів в процесах перемішування і супутніх процесів.

Annotation — the article deals with the analysis of efficient and its improvement during the dough making process. Several research findings and data were analyzed and studied including but not limited to interconnections and interdependencies during the dough preparation, terminology use, algorithm, structure, phases of dough preparation, connection between technologies and connecting them to specific equipment, systems, new technologies and new innovative ideas in the dough making and dough mixing process.

Ключевые слова: тестомесильная машина, тестоприготовление, процесс, технология, теория, эксперимент.

Keywords: dough mixing equipment, dough preparation, process, technologies, theory, experiment.

Постановка проблемы. Общемировая тенденция расширения ассортимента и улучшения качества готовой продукции направлена на внедрение прогрессивного современного оборудования в пищевое производство. Совершенствование технологий замеса хлебопекарного, макаронного и кондитерского теста решает эти вопросы. Оно определяет создание оптимального состояния перемешиваемого сырья в рабочем объеме тестомесильной машины. Комплекс задач, решаемых в этот период, позволяет концентрировать энергетическое воздействие в тестоприготовлении при одновременном снижении энергозатрат и управлении направления протекания качествообразующих процессов [1].

В связи с выявленными проблемами в работе тестомесильных машин были определены направления исследований процессного анализа тестоприготування. Ею является установление оптимального технологического и технического режима замеса. Она проводилась в соответствии с принятыми задачами, методами, теоретическими и экспериментальными данными. Решались следующие задачи в областях исследований:

1. определить подходы в эффективном управлении пищевым производством;
2. сформулировать направления внедрения инновационных технологий замеса;
3. оптимизировать тенденции формирования характеристик тестоприготування;
4. провести исследование перспектив развития тестомесильных машин;
5. обосновать повышение эффективности замеса теста.

Анализ эффективных технологий замеса показывает, что интенсификация замеса является актуальной тенденцией пищевых производств [1-7]. Процессный анализ тестоприготування сконцентрирован на поиске путей решения проблемы внедрения в производство новых подходов замеса и их адаптации к существующим условиям производства. Современные критерии качества готовой продукции в хлебопекарных, макаронных и кондитерских технологиях ведут к поиску следующих направлений интенсификации сопутствующих процессов и процессов перемешивания: энергосбережение, технологичность рецептуры выпускаемой продукции, эффективность производственного цикла замеса, согласованность производственного такта технологических операций, товароведческие аспекты в оценке качества теста, рентабельность работы тестомесильной машины и т.д.

Цель статьи (задачи). Целью оценки и анализа тестоприготування является определение направления научного поиска и конструктивной разработки параметров тестомесильных машин. Основной целью модернизации и нововведений, является улучшение технологических параметров теста и перемешиваемого сырья в период замеса [1]. Для выполнения выбранной цели необходимо решить следующие задачи исследований:

1. определить структуру исследований;
2. сформулировать современные тенденции развития интенсификации тестоприготування;
3. установить эффективное построение методологии;
4. обосновать перспективы развития основ теории тестоприготування.

Основная часть. Возможность применения новых технологий в тестоприготуванні на базе существующих технических мощностей пищевых производств, даёт возможность провести комплексный анализ оптимального режима технологий замеса. При этом учитывается совмещение различных процессов, что, в конечном счете, даёт возможность максимальной загрузки тестомесильной машины. Однако при исследовании интенсификации замеса возникает вопрос о точности применяемой терминологии [1-7]. Стремление снизить все виды затрат при тестоприготуванні, без снижения в дальнейшем органолептических свойств теста, заставляет искать пути интенсификации. Одним из таких направлений является интенсификация процесса замеса, способствующая повышению качества технологической

операции. Специфические детали терминологии, применимой в данном спектре пищевых производств, даёт возможность определить уровень варьирования, сочетания, взаимосвязи и ширину коридора факторов энергетики процесса и качественных преобразований теста, представлена на рисунке 1.

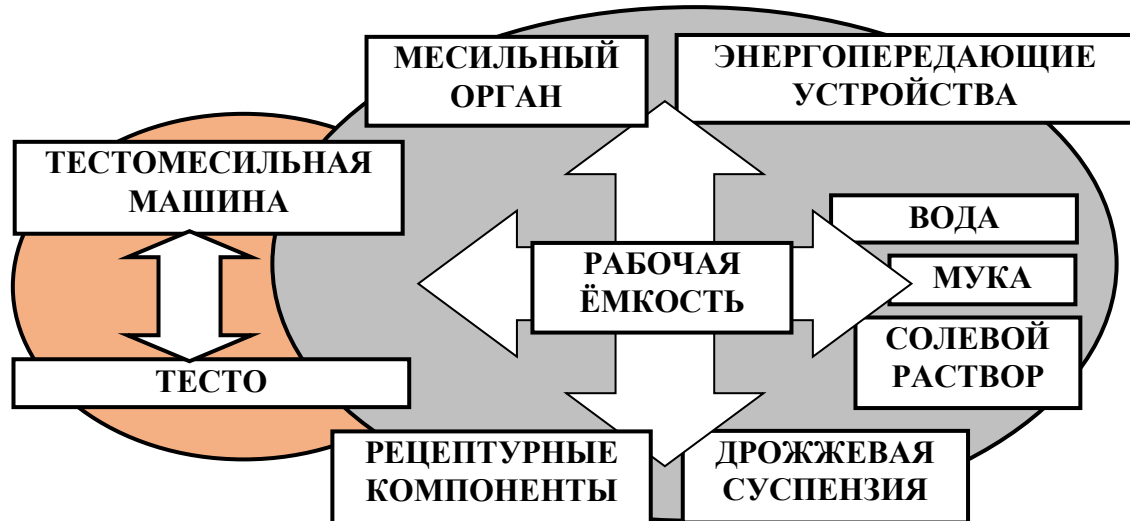


Рис 1. Взаимосвязь составляющих тестоприготовления.

Поиск путей интенсификации процессов тестоприготовления является актуальной научной проблемой пищевых наук. Тщательный анализ этапов технологической цепочки хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств, позволяет прийти к выводу — процесс замеса теста является центральным звеном, формирующим качественные показатели конечной продукции. В пищевых технологиях интенсифицировать процесс тестоприготовления возможно различными способами, при этом их обоснованность, эффективность и экономичность не всегда находили своё подтверждение. Сокращение времени замеса в традиционных технологиях, без изменения энергетического воздействия в процессе замеса, приводит к ухудшению качества теста. В связи с этим возникает потребность за счёт интенсификации периода обработки теста уменьшить длительность замеса. В раскрытии вопроса энергетических и структурных изменений теста целесообразно опираться на следующую терминологию:

Главное задание пищевой технологии — осуществление задачи, реализуемой как максимально возможной в изготовлении продукции заданного уровня и качества, в пределах допустимых исходными количественными и качественными показателями рецептурных компонентов при наименьших материальных и научно-методических затратах. Объектом исследований является пищевое оборудование, процессы, рецептурное сырьё и выпускаемая продукция.

Энергосбережение — научный подход, при котором происходит совершенствование процессов и структуры энергетического воздействия на перемешиваемое сырьё и тесто в период замеса с целью снижения энергозатрат тестомесильной машиной, при одновременном повышении или стабилизации качества выпускаемой продукции (теста).

Интенсивность процесса — количество продукта, произведенного за единицу времени, отнесённая к параметрам, критериям или механизмам машины.

Задание технологии (науки) — определение, формулирование и доказательство законов, закономерностей и зависимостей с целью формулирования в пищевых производствах наиболее эффективных и результативных процессов.

Тестомесильная машина — пищевое оборудование, предназначенное для осуществления технологической операции замеса теста. Работает в заданном режиме для преобразования процессов энергозатрат, характера, режима и метода энергетического воздействия на перемешиваемое сырьё и тесто.

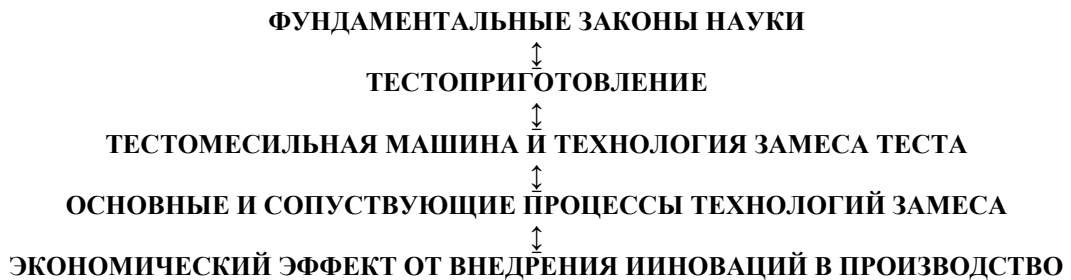
Мониторинг — непрерывное отслеживание состояния пищевой технологии.

Уровень технологии — подход в формировании системы, которая является характеристикой качества технологии. Он определяется технологическим уровнем продукции, уровнем научно-исследовательских, проектных и конструкторских работ.

Качество — степень требований, совокупность свойств, количественных и качественных показателей, характеристики которых определяют способность удовлетворять требования применяемых технологий.

Установление закономерности связи экстремума контролируемых параметров и оптимума качества тестоприготовления, показывает, что последовательность связи сохраняется при изменении структуры процессного воздействия на тесто. Наукоёмкие (передовые) технологии являются возможностью расширения выпускаемого ассортимента и варьирования качественными показателями конечной стоимости продукции. Выбор технологически обоснованных режимов работы тестомесильных машин

основан на комплексном подходе в процессном анализе тестоприготовления. Проведенный анализ терминологии, применяемой в исследованиях технологической операции замеса, позволил точно описать основные тенденции и закономерности прогресса данной технологической операции. Принципиальная структура, выражена в направлениях исследований через алгоритм:



Изменения, связанные с перемешиваемым сырьём и тестом при тестоприготовлении, являются прогнозируемыми и взаимосвязанными, их сочетание реализуется в эффективном энергосбережении производственного цикла представленного в виде интенсификации технологической операции замеса. Дальнейшая интенсификация качествообразующих процессов: водопоглощение, рост стойкости структуры, время образования интермолярных связей теста приводит к определению рациональных параметров замеса. Поэтому важным направлением интенсификации является выбор и расчёт производственной рецептуры теста с учётом сложности конструктивно–технологических особенностей замеса.

Для решения этой проблемы необходим всесторонний анализ путей сокращения времени энергетического воздействия на тесто и перемешиваемое сырьё, а также способов улучшения их качественных показателей. Так как процесс замеса является многофакторным объектом исследования, то необходимо выполнить разноплановые исследования с использованием метода планирования эксперимента и проведения конструкторских исследований, а также анализа выполненных ранее современных направлений интенсификации хлебопекарных, макаронных и кондитерских процессов замеса теста. В направлениях интенсификации тестоприготовления можно выделить следующую структуру научных исследований:

1. Анализ возможности применения интенсификации тестоприготовления.

Анализ конструкторских схем тестомесильных машин и их дополнительных устройств показывает разнообразие методов энергетического воздействия на тесто. Основной их целью является улучшение технологических параметров компонентов в период замеса, без значительных энергетических затрат. Преимущество — максимальное уменьшение времени реализации технологической операции замеса на существующем оборудовании при снижении всех видов затрат. Недостаток — неопределённая взаимосвязь сочетания качествообразующих процессов теста и энергетических затрат тестомесильных машин.

2. Определение условий применения новых технологий замеса в тестоприготовлении.

В данный момент ограниченно распространены ускоренные технологии замеса с использованием инновационных подходов и адаптации достижений фундаментальных наук. Широкое их применение на пищевых предприятиях тормозится отсутствием теоретической базы тестоприготовления, способной интенсифицировать процесс замеса. Преимущество — проблема может быть решена в случае достаточной рентабельности сектора хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств "Высокая цена ↔ отличное качество". Недостаток — основным препятствием широкого применения в тестоприготовлении является стоимость новшеств и как следствие удорожание выпускаемой продукции.

3. Установление эффективности энергетического воздействия, характера энергозатрат и метода воздействия тестомесильных машин.

В интенсивном механическом воздействии на тесто и перемешиваемое сырьё большое значение оказывает сочетание технических и технологических факторов тестоприготовления. Установление эффективности энергетического воздействия тестомесильных машин основано на рекомендациях практического характера, связанных с внедрением изобретений на пищевых предприятиях отделами главного конструктора и технолога, отчасти рекомендаций ученых. Преимущество — взаимосвязь между энергетическим воздействием тестомесильной машины и качественными и количественными характеристиками сырья хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств. Недостаток — высокая стоимость оборудования, для комплексной реализации данных процессов.

Таблица 1. Эффективность технологического процесса замеса.

№ п/п	Наименование проблемы.	Проблематика.
1.	Рецептура хлебопекарной, макаронной и кондитерской продукции.	Технологическая.

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.	Качественные и количественные показатели сырья и материалов.	Товароведческая.
3.	Технические возможности тестомесильной машины.	Техническая. Процессная.
4.	Построение технологий замеса:	Товароведческая. Технологическая. Техническая. Процессная.
	• Замес опары	
	• Расстойка опары.	
	• Замес теста.	
	• Брожение теста	
5.	Качественные и количественные показатели теста.	Товароведческая. Технологическая. Процессная.
6.	Экономическая и технологическая оценка процессов перемешивания и сопутствующих процессов.	
7.	Корректировка и анализ технологического процесса замеса.	Технологическая. Техническая. Процессная.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n q_i K_i \\ K_i = \sum_{j=1}^n k_j^i x_{ij} \\ K_1 = \sum_{j=1}^{n_j} k_j^1 x_{1j} \\ x_{1j} = \sum_{s=1}^{n_j} k_{js}^1 x_{1js} \end{array} \right. , \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

где, K_{Σ} – эффективность применения пищевого оборудования (тестомесильной машины);
 K_i – эффективность использования технологий замеса теста в цикле пищевых производств;
 K_1 – эффективность применения экспертной оценки (K_{Σ} и K_i);
 x_{1j} – время технологического такта производства теста;
 q_i – коэффициент, характеризующий передачу кинетической энергии через энергопередающие механизмы тестомесильной машины;
 k_j^i – коэффициент, характеризующий преобразования потенциальной энергии теста, демонстрирующий качественные изменения в выпускаемой продукции;
 k_{js}^i – потенциальная энергия, демонстрирующая изменения в качествообразующих процессах теста;
 x_{1js} – коэффициент, характеризующий уровень, качество и количество качествообразующих процессов тестоприготовления;
 n – количество факторов в технологии замеса, которые возможно изменять для корректировки тестоприготовления;
 n_j – соответствие качественных показателей рецептурного сырья применяемым хлебопекарным, кондитерским и макаронным технологиям выпускаемой продукции;
 s – результативность технических возможностей тестомесильной машины.

4. Обоснование направлений взаимосвязи качествообразующих процессов теста.

Интенсификация технологической операции замеса зависит от качественных и количественных характеристик сырья, так как существенную роль в этот период играют качествообразующие процессы теста, воздействующие на весь объем исходных компонентов. Преимущество — одним из возможных путей обоснования направлений взаимосвязи замеса является установление взаимосвязи рецептуры хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств и параметров варьирования технологического процесса замеса. Недостаток — сложность аппаратурной реализации достаточных качествообразующих процессов в сырье и тесте в зависимости от рационального времени энергетического воздействия.

5. Определение взаимосвязи качествообразующих процессов теста и энергозатрат тестомесильных машин.

Условия эксплуатации тестомесильных машин позволяют выявлять особенности и наметить перспективы внедрения нововведений. Интенсификация реализации процессов перемешивания и

сопутствующих процессов связана с воплощением в производство идей научно–технического прогресса. Преимущество — установление рационального времени энергетического воздействия на тесто и перемешиваемое сырьё. Определение времени протекания реализации осуществления качествообразующих процессов тестоприготовления. Недостаток — проблемно комплексно определить структуру, динамику и параметры характеристик тестоприготовления по времени реализации процессов.

6. Выбор экономического обоснования технологий замеса.

Оптимизация расчёта экономического обоснования параметров технологий замеса позволяет сократить длительность производственного цикла, повысить качество теста и снизить энергозатраты тестомесильных машин. В производственной практике данный подход позволяет выполнить корректирующую роль существующих технологий замеса без функциональных изменений процессов тестоприготовления. Преимущество — решение вопроса взаимосвязи качества теста и различных способов тестоприготовления. Недостаток — выпускаемая продукция хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств носит узкоспециализированный характер.

7. Анализ процессов тестоприготовления.

Внедрение новых технологий замеса зависит от результативного взаимодействия теста, а также перемешиваемого сырья, с месильным органом тестомесильных машин и их дополнительных устройств. Организация и направление процессов тестоприготовления определяет эффективность технологической операции замеса поставленным целям хлебопекарных, макаронных и кондитерских производств. Преимущество — возможность адаптации отдельных процессов тестоприготовления под наиболее эффективное проведение технологической операции замеса. Недостаток — высокая стоимость и сложность аппаратной и методической реализации.

При реализации технологий замеса огромное значение играет роль возможности оперативного варьирования энергозатратами, характера, режима и метода воздействия тестомесильных машин в рабочей ёмкости. В целом это даёт возможность определять количественные и качественные показатели теста, что, в конечном счете, определяет стоимость выпускаемой продукции. Полное представление об эффективности применения новых подходов в процессах перемешивания и сопутствующих процессов, возможно, сформулировать в виде системы уравнений:

Экономический эффект представленный на рисунке 1, в системе уравнений (1–4) от эффективности применения новых подходов в процессах перемешивания и сопутствующих процессах даёт возможность получить представление о возможности управления процессами тестоприготовления. Комплексный анализ технологического цикла хлебопекарных, кондитерских и макаронных производств определяет направления применения технологий замеса. Дальнейшая адаптация производственных функций тестомесильных машин позволяет максимально увеличить производство теста с различной степенью однородности. Подобный подход позволяет проводить политику финансовой минимизации затрат при реализации тестоприготовления, с другой стороны, максимально реализовать потенциальные возможности рецептурного сырья, применяемых технологий, экономических возможностей пищевого предприятия и экономической ориентации по сегменту рынка выпускаемой продукции. Определение качества выпускаемой продукции зависит от достижения технологически обоснованного уровня теста.

Оценка и анализ тестоприготовления направлена на создание целостного методологического подхода, направленного на интенсификацию технологической операции замеса. Технологический процесс связан с воплощением в производстве технических идей, основной целью которых является улучшение технологических, органолептических и структурно-реологических параметров компонентов без значительных энергетических затрат. Структура, тенденции, построение в теории тестоприготовления дают возможность сформулировать направления научного поиска и конструктивной разработки параметров тестомесильных машин. Одним из возможных путей обоснования направлений взаимосвязи замеса является установление взаимосвязи рецептуры и параметров варьирования технологического процесса замеса.

Выводы. Получены результаты исследований и анализа повышения эффективности тестоприготовления:

1. Получена система уравнений, описывающая эффективность применения новых подходов в процессах перемешивания и сопутствующих процессов.
2. Установлена взаимосвязь экспертной оценки и процессов с технологией замеса и оборудования.
3. Определены направления интенсификации тестоприготовления и их структура.
4. Проведён анализ терминологии, применяемой в исследованиях технологической операции замеса.
5. Установлен алгоритм структуры, определяющий направления исследований.
6. Дальнейшее проведение экспериментальных исследований позволит уточнить результаты исследований и анализа тестоприготовления

Литература.

1. Янаков В.П. Обоснование параметров и режимов работы тестомесильной машины периодического действия: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.18.12. – "Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств" / В.П. Янаков. – Донецк.: Мин-во образ. и науки Украины, Донецкий нац. ун-т экономики и торговли им. М. Туган-Барановского, 2011. – 20 с.
2. Смесительные машины в хлебопекарной и кондитерской промышленности / [А.Т. Лисовенко, И.Н. Литовченко, И.В. Зирнис и др.]; под ред. А.Т. Лисовенко – К.: Урожай. – 1990. – 192 с.
3. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган – М.: Гос. научн. –техн. изд-во хим. Лит-ры. – М.: – 1962. – 848 с.
4. Зайцев Н.В. Технологическое оборудование хлебозаводов / Н.В. Зайцев — М.: — Пищ. пром-сть. – 1967. – 250 с.
5. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.И. Баранцев. – М.: Лёг. и пищ. пром-сть. – 1983. – 328 с.
6. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевых производств / Г.Д. Кавецкий, Королев А.В. – М.: Агропромиздат. – 1991. – 432 с.
7. Липатов Н.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / Н.Н. Липатов - М.: Экономика. – 1987. – 272 с.

УДК 664.863(083.74)(476)

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Давар Ростами Пур, фирма «D.R.P.», Teheran, Iran
Войтенко А.К. , Светличный П.И., Мордынский В.П.
Одеська національна академія харчових технологій

PRINCIPLES FOR FORMING THE OPTIMAL STRUCTURE OF ENERGY EFFICIENT MATERIALS

Davar Rostami Pur, firma "D.R.P.", Teheran, Iran
Voitenko A.K. , Svetlichny P.I., Mordynsky V.P.
Odessa national academy of food technologies

***Аннотация.** Рассмотрены мировые тенденции на рынке соков. Анализируются перспективы гранатового сока в Украине. Сравниваются современные технологии концентрирования соков. Показаны преимущества низкотемпературных методов концентрирования. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения концентрированного гранатового сока.*

Abstract. The world trends in the juice market are considered. The prospects of pomegranate juice in Ukraine are analyzed. Contemporary technologies of juicing are compared. The advantages of low-temperature methods of concentration are shown. The prospects of block freezing technologies for obtaining concentrated pomegranate juice are grounded.

Ключевые слова: гранатовый сок, концентрирование сока, низкотемпературные методы концентрирования, технологии блочного вымораживания.

Key words: pomegranate juice, juice concentration, low-temperature methods of concentration, technologies of block freezing.

Введение.

Рынок соков - один из самых динамичных в мире. По данным [1] только в Германии за последние 50 лет годовой объем потребления сока на душу населения вырос в 40 раз: с 1,9 литра до 44,3 литра. В среднем житель Европы, Северной Америки или Японии выпивает в год 30-40 литров. Потребление увеличивается ежегодно на 10-12 процентов. Меньше прочих жителей развитых стран соки пьют англичане - 19 литров и финны - 18.

В общем, сок является популярным напитком в Украине [2, 3]. На украинском рынке представлен широкий ассортимент соков и соковой продукции различных брендов и торговых марок. К соковой продукции, кроме соков, относят также нектары, морсы и сокодержательные напитки [4, 5]. По данным [3] почти 40% украинцев покупают сок несколько раз в неделю, а 25% - несколько раз в месяц. Ежедневно сок покупают более 20%, а 8% - только по праздникам, и около 3% вообще не пьют соки.

Чаще всего покупают сок в упаковке объемом 1л (53,2%), а интерес к упаковкам 2л и 1,5л проявляют 15,5 и 14,2%, соответственно. Наиболее популярными вкусами сока являются апельсиновый, яблочный, вишневый и мультивитамин. Больше всего покупают сок в картонной упаковке, меньше всего - в пластиковой бутылке. На выбор сока в большей степени влияет его вкус (36,3%), далее - качество продукции (30%), цена (11,5%), торговая марка или бренд (11,5%), производитель (8%) и привлекательность упаковки (2,7%) [3].

2. Обзор литературных источников и формулировка проблемы

Сокам посвящена обширная научно-техническая литература. Подробно для большого количества соков рассмотрены вопросы их физических и химических свойств, технологии производства, медицинские и лечебно-профилактические аспекты [4].

В производстве цитрусовых концентрированных соков, прежде всего апельсинового, доминируют Бразилия и США [1]. Подавляющая часть апельсинов выращивается в бразильском штате Сан-Паулу и во Флориде. Урожай апельсинов в Бразилии оценивается в 12 млн.т. Примерно 8 млн. т. направляется на переработку, из которых получают 800 тыс.т. апельсинового сока концентрацией 66 (по Бриксу). В некоторые годы выпуск сока в стране превышал 1 млн.т.

Важное место на мировом рынке соков занимает другой вид цитрусового сока - грейпфрутовый. Однако в его производстве и экспорте доминирует одна страна - США. На долю этой страны приходится 2/3 мирового выпуска данной продукции [1]. Категорию цитрусовых концентратов дополняют лимонный сок. Мировой сбор лимонов достигает 10 млн.т.

На рынке яблочного сока ведущую роль играет Китай. На долю этой страны приходится почти половина мирового производства яблок, которое возросло до 50 млн.т. Китай - крупнейший экспортер концентрата яблочного сока; его удельный вес в мировом экспорте этого продукта приближается к 13%.

Из европейских стран лишь Германия смогла увеличить сбор яблок - до 2,5 млн. В Польше сбор яблок сократился с 1,1 млн.т. до 600 тыс.т. Прогнозируется увеличение выпуска грушевого сока. Объем переработки груш повысится до 1,57 млн. т с 1,49 млн. При этом для промышленных целей в Китае будет использовано 410 тыс. т груш, в США - 360 тыс., в Аргентине - 206 тыс.

В Западной Европе в последнее время наблюдается повышение спроса на виноградный сок. Главными его поставщиками здесь выступают Италия и Испания. Как правило, они удовлетворяют подавляющую часть потребностей ЕС в концентрате этого сока. Вырос спрос на вишневый сок.

Ананасовый сок - основной в группе так называемых тропических соков. Главным его экспортером выступает Таиланд. Его доля в мировом экспорте определяется в 50 - 55%. Крупным поставщиком этого сока являются также Филиппины, Кения и Индонезия. «Тропические соки» на мировом рынке представлены также концентрированным и неконцентрированным соком манго, который пользуется все большим спросом. Монополию на рынке указанного сока удерживает Индия, несмотря на появление ряда новых поставщиков этого продукта.

В настоящее время все больший интерес у покупателей вызывает гранатовый сок [6 - 8]. Отмечается, что антиоксидантный потенциал гранатового сока выше, чем красного вина и зеленого чая, и индуцируется через эллаготанины и гидролизованные танины [7], а также посредством того, что активные аномерные эллаготанины отвечают за более чем 50 % антиоксидантного потенциала сока [8].

Самые важные факторы, от которых зависит стабильность антоцианов - ферменты, температура, кислород, pH, ионы металлов, аскорбиновая кислота, свет и т. д. [9 - 16].

Лучшие производители извлечение сока проводят в щадящем режиме на пневматических мембранных прессах (путем мягкого давления на зерна) вместо шнековых (извлечение сока перетиранием зерен),

распространенных на других предприятиях. Благодаря применению замкнутой технологической схеме с минимальным контактом с воздухом исключено течение окислительных процессов. На продукт оказывается щадящее тепловое воздействие с применением пастеризаторов (до 100 °C).

После пастеризации свежавыжатый сок хранится в асептических емкостях из нержавеющей стали по 50 куб.м. (на 5 000 тонн единовременного хранения). Популярны технологии применения для хранения сока в обычных емкостях различных консервантов. Важным вопросом современных технологий производства концентратов является расход энергетических ресурсов [17]. Неоспоримым фактом является то, что лучшее качество концентрата гранатового сока может быть достигнуто в технологиях криоконцентрирования. Процессы низкотемпературного разделения растворов обеспечивают высокое качество готового продукта, этот фактор особенно ценен для пищевых технологий, цель которых максимально сохранить весь комплекс природных полезных компонентов сырья.

Однако научные основы технологий криоконцентрирования гранатового сока практически отсутствуют, слабо развиваются исследования моделирования процессов концентрирования вымораживанием.

Научные представления о процессах низкотемпературного разделения растворов за последнее десятилетие практически не изменились. Развитие фундаментальных моделей работ [18, 19] в научно-технической литературе не обнаружено. Усилия исследователей сосредоточены на балансовых и тепловых моделях.

Вопросы кинетики образования льда рассмотрены в работе [20] с позиций исключительно тепловой модели. Авторы [20] оперируют понятием «емкостной» криоконцентратор. По сути, рассмотренный принцип ничем не отличается от технологии «блочного вымораживания», приоритет на который получен в ОНАХТ еще в 1992г. [18]. Объектами исследований в работе [20] были молоко и молочная сыворотка.

В работе были исследованы процессы разделительного вымораживания обезжиренного молока. Лабораторный емкостной криоконцентратор позволяет производить одновременно разделительное вымораживание обезжиренного молока в одном цилиндре и плавление вымороженной фракции в другом. Плавление водной фракции в одном цилиндре осуществляется за счет теплоты, отводимой от намораживаемого льда в другом цилиндре. Температура теплообменной поверхности емкости, в которой происходит разделительное вымораживание, поддерживается стабильной в диапазоне от минус 2 до минус 8 °C с точностью $\pm 0,2$ °C. Лед на теплообменной поверхности емкостного криоконцентратора намерзает в виде полого цилиндра, толщина стенки которого зависит от температуры теплообменной поверхности и продолжительности процесса разделительного вымораживания. На основании классических уравнений тепломассопереноса была разработана математическая модель кристаллизации водной фракции обезжиренного молока на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора. Исходными данными для нахождения зависимости толщины слоя вымороженного на цилиндрической поверхности льда от продолжительности процесса являются: температура поверхности криоконцентратора и криоскопическая температура концентрируемого продукта, а также геометрические параметры криоконцентратора. Полученные расчетные зависимости были сопоставлены с экспериментальными данными. Установлено соответствие расчетной модели разделительного вымораживания обезжиренного молока на цилиндрической поверхности реальному процессу разделительного вымораживания

Задавшись реальными геометрическими параметрами криоконцентратора, а также температурой теплообменной поверхности $t = -4$ °C и криоскопической температурой $t = -0,55$ °C, был произведен расчет процесса намораживания льда в течение 3 ч на цилиндрической поверхности при различных величинах единичного интервала времени Δt (1с, 10с, 60с).

Установлено, что для расчета толщины слоя льда в зависимости от времени разделительного вымораживания достаточно использовать единичный временной интервал $\Delta t = 10$ с и усреднение теплового потока в начале и в конце временного интервала. Недостатком полученной модели является то, что принимались фиксированными плотность теплового потока, температуры фазовых равновесий и поверхности испарителя, не учитывались изменения свойств продукта, механизмы диффузии. Это серьезным образом ограничивает возможности применения модели для гранатового сока.

Оптимизация температурного режима в кристаллизаторах - криоконцентраторах проводилась в [21] на основе технико - экономических расчетов. Уменьшение перепада температур при заданной тепловой производительности кристаллизатора приводит к увеличению его теплопередающей поверхности, массы и стоимости. С другой стороны, при заданной температуре охлаждаемой среды или кипения хладагента, оно приводит к уменьшению внешней необратимости (рост температуры кипения и снижение температуры конденсации хладагента), т.е. к сокращению мощности, потребляемой компрессором холодильной машины. Увеличение температурного напора, соответственно, действует в обратном направлении. Суть оптимизации - определение перепада температур, при которых переменная часть приведенных годовых затрат Π достигает минимума:

$$\Pi = \kappa \dot{E} n \Delta \kappa + P_{\kappa} + \dot{E} \kappa \quad (1)$$

где k – поправочный коэффициент; E_n – нормативный коэффициент эффективности; A_k – амортизация стоимости кристаллизатора; R_k – затраты на ремонт кристаллизатора; E_k – годовая стоимость электроэнергии, израсходованной на привод компрессора холодильной установки.

Подход [21] целесообразно использовать при оптимизации установки для криоконцентрирования гранатового сока.

В работе [22] проведены экспериментальные исследования процесса криоконцентрирования. Получена регрессионная модель, позволяющая определить массовую долю сухих веществ в зависимости от температуры и продолжительности процесса:

$$ms = -0,7\tau \cdot t - 0,024t^2 - 0,155t + 3,767 - 0,012\tau + 0,011\tau^2, \quad (2)$$

где ms – содержание сухих веществ, %; τ – время от начала процесса кристаллизации, час; t – температура хладоносителя от -2 до -6°C .

Модель (2) характерна для очень узкого диапазона температур, имеет ограниченные, сугубо частные условия применения.

3. Научная гипотеза и постановка задач исследований

Приемлемость той или иной технологии определяется стоимостью готового продукта, которая значительно зависит от энергопотребления различных процессов. Низкотемпературные технологии, по сравнению с традиционным выпариванием, характеризуются более низким уровнем энергетических затрат. Меньшая работа требуется для перевода вещества в более организованную структуру. Поэтому технологии вымораживания отличаются меньшей энергоемкостью, чем выпаривание.

В низкотемпературных блочных разделительных установках [18] формирование на стадии кристаллизации блока льда дает возможность простыми методами организовать процесс сепарирования раствора из пористой структуры блока. Процессы гравитационного сепарирования дают возможность надежно регулировать концентрацию неводных компонентов в расплаве льда. Использование новых методов организации процессов кристаллизации и сепарирования позволило создать гамму вымораживающих установок блочного типа. Это установки многофункционального назначения. Они испытаны в технологиях концентрирования соков, экстрактов, молочных продуктов, уксусных растворов, кофе, фракционирования вина и молочной сыворотки [18], вишневого сока [23].

Установки блочного вымораживания хорошо себя зарекомендовали в процессах опреснения воды. В установках предусматривается и утилизация энергии льда (рециклинг) для повышения энергетической эффективности холодильного цикла. Достоинствами низкотемпературных технологий блочного разделения растворов являются отсутствие системных потерь энергии во вспомогательных узлах, простоте конструкции кристаллизатора, простота реализации эффективного гравитационного сепарирования. Холодильные методы стали известны со второй половины XX века и в настоящее время менее распространены, несмотря на ряд их преимуществ. Они обладают меньшей коррозией, меньшими капитальными затратами, более высокой термодинамической эффективностью. Современные технологии криоконцентрирования состоят из двух основных этапов. Для традиционных технологий характерно, что процесс образования кристаллов льда протекает интенсивно, а сепарирование, как правило, является продолжительным, трудоемким и требует больших затрат энергии. В общем энергетическом балансе затраты энергии на кристаллизацию составляют только половину всех затрат энергии. Можно сделать вывод, что сепарирование в значительной степени определяет энергетику технологии и величину потерь продукта с ледяной фракцией. Системный анализ показывает, что можно получить общий выигрыш в продолжительности, энергетических затратах, если иначе организовать процессы. Представляется целесообразным согласовать интенсивности процессов генерации льда и сепарирования. Эта идея лежит в основе технологии блочного вымораживания [18].

Выполненный выше анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Плоды граната являются перспективным сырьем лечебно-профилактического назначения.
2. В последнее время на рынке растет интерес к высококачественным концентратам из плодов граната.
3. Традиционные технологии переработки плодов граната не отвечают современным требованиям ни по эффективности использования энергии, ни по качеству получаемых концентратов, ни по глубине их переработки [24].
4. Известные технологии переработки плодов граната не используют передовые достижения науки и техники в области энергоэффективных подходов концентрирования сока, принципы адресной доставки энергии к элементам сырья.

Инновационные, энергоэффективные технологии концентрирования соков целесообразно разрабатывать на основе низкотемпературных технологий, из которых особенно перспективны установки блочного вымораживания [18, 19]. Сформулируем основные принципы для реализации идеи блочного вымораживания:

- исключить из технологической схемы вспомогательное оборудование: насосы, промежуточные емкости и пр.;

- организовать процесс образования на холодной поверхности блока льда с плотной упаковкой кристаллов;
- выращивание блока льда проводить на игольчатых испарителях специальной конструкции при условии постоянного роста величины поверхности раздела «лед - раствор».

Такой подход позволит серьезно упростить второй этап - сепарирование. Появляется возможность проводить сепарирование в условиях гравитационного стекания концентрата из блока льда, а в качестве управляющего фактора использовать температуру воздуха в сепараторе.

Выводы. Основное отличие технологии блочного вымораживания заключается в том, что вместо машинного принципа работы кристаллизатора используется аппаратный. Это является серьезными предпосылками для существенного упрощения технологической схемы, позволяет создать простую и надежную конструкцию вымораживающей разделительной установки, значительно снизить расход энергии. Основные достоинства технологии блочного вымораживания следующие:

- отсутствие схемных потерь энергии во вспомогательных узлах;
- простота конструкции кристаллизатора (переход от машинного принципа к аппаратному);
- простота реализации эффективного гравитационного сепарирования;
- использование новых простых методов организации процессов кристаллизации и сепарирования.

Движущей силой процесса сепарирования являются силы гравитации.

Принципиально, установки блочного вымораживания должны иметь более широкие перспективы, чем сложные системы криоконцентрирования.

Литература

1. Потребление соков в мире yandex.ua/images
2. refdb.ru>book/1731693.html
3. [koloro.ua>blog/issledovanie sokov...v](http://koloro.ua>blog/issledovanie_sokov...v)
4. Осипова Л.А. Функциональные напитки /Осипова Л.А., Капрельянц Л.В., Бурдо О.Г. Одесса «Друк», 2007.-288с.
5. ДСТУ-П-4150:2003. Соки, напої сокові, нектари плодово-ягідні, овочеві та з баштанових культур. Загальні технічні умови: - Введ.01.09.2004. - К.: Держспоживстандарт України, 2004. -19с.
6. Milner J.A. Functional foods and health: a US perspective // British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
7. Lucas J. EU-funded research in functional foods //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
8. Basu A. Pomegranate juice: a heart-healthy fruit juice. / A. Basu, K. Penuqonda //Nutr. Rev.— 2009. — vol. 67. issue 1. — p. 49—56.
9. Fisher U.A. Kammerer thermal stability of anthocyanins and colourless phenolics in pomegranate (*Punica granatum* L) juices and model solutions /U.A. Fisher, R. Carle and R. Dietmar // Food Chemistry. — 2013. — vol. 138. — issues 2—3. — p. 1800—1809.
10. Malik A. Pomegranate fruit juice for chemoprevention and chemotherapy of prostate cancer. / Malik A., Afaq F., Sarfara S. [et al.] // Proc Natl Acad Sci USA, — 2005. — vol. 102. issue 41. — p. 108—113.
11. Miguel G. The contraction of anthocyanins in fruits of «Assaria» hmegranate a sweet Portuguese cultivar typically grown in Algarve (south Portugal), was monitored during storage under different conditions / G. Miguel, C. Fontes, Antunes D. [et. Al.] // Biomed Biotechnol. — 2004. — № 5. — p. 338—342.
12. Karnan M. Effects of processing method and storage temperature on clear pomegranate juice turbidity and color change /M. Karnan, N. Tetik and I. Turnan // Food Processing and Preservation. — 2013. — vol. 37. — issue 5. — p. 899—906.
13. Zarfeshany A. Potent health effects of pomegranate /A. Zarfeshany, S. Asqary and S.H. Javanmard // Adv Biomed Res., 2014.-3:100. [Elektronik resource] — URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4007340/> (date of treatment 2014.03.25).
14. Patel C. Safety assessment of pomegranate fruit extract: acute and subchronic toxicity studies / Patel C., Asqary S., Javanmard S.H. [et al.] // Food Chem Toxicol. — 2008. — vol. 46. — issue 8. — p. 2728—2735.
15. Swain T. The phenolic constituents of *Prunus Domestica* L. The quantitative analysis of phenolic constituents/ T. Swain, W. Hillis// J. Sci. Food Agric. — 1959. — vol. 10. — № 1. — p. 63—68.

16. Марх А.Т. Полифенолы гранатов /А.Т. Марх, Т.А. Лысогор // Известия вузов СССР. Пищевая технология. — 1973. — № 2. — с. 36—38.
17. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение /А.И. Соколенко, А.И. Украинец, В.Л. Яровой и др.; под ред. А.И. Соколенко. — К.: АртЭк, 2003.- 432с.
18. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
19. Бурдо О.Г., Миличук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.
20. Гунько П.А. Исследование и разработка технологии извлечения белковых компонентов из творожной сыворотки низкотемпературными методами. /дис. к.т.н., 2014, Кемерово 2014 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (ФГБОУ ВПО «КемТИПП»).
21. Мальцева О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3 с.118- 123 / ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
22. Овсянников В.Ю., Краминова Ю.С., Кириченко Т.С., Москаленко А.С. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ-КРИОКОНЦЕНТРАТОРАХ // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 43-44;
URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14704> (дата обращения: 01.01.2017).
23. Бостынец Н.И., Овсянников В.Ю. Исследования и разработка установки для криоконцентрирования вишневого сока.
24. Гафизов Г. К., Гафизов С. Г. ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ОБРАБОТКИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ХРАНЕНИЯ ГРАНАТОВОГО СОКА НА СОХРАННОСТЬ АНТОЦИАНОВ // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XLIII междунар. науч.-практ. конф. № 2(39). – Новосибирск: СибАК, 2015.

УДК 699.86

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Керш В.Я., к.т.н., проф., Колесников А.В., к.т.н, ст.преп.,
Гедулян С.И.,к.т.н, ассистент,Твердохлеб С.А., аспирант**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

PRINCIPLES OF FORMATION OF THE OPTIMAL STRUCTURES OF ENERGY EFFICIENT MATERIALS

V. Kersh, cand. of techn. sciences, professor, A. Kolesnikov, cand. of techn. sciences, senior lecturer, Gedulyan S.I., cand. of techn. sciences, assistant professor, S. Tverdochleb, graduate student

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

***Аннотация:** В статье рассматриваются методические приемы синтеза энергоэффективных строительных композиционных материалов на основе методов теории перколяции и структурной оптимизации. Основная проблема, возникающая при проектировании материала, заключается в обеспечении требуемых теплоизоляционных свойств и прочностных характеристик. Для ее решения используется теория протекания, позволяющая определить долю теплоизоляционного заполнителя, при которой прерываются основные пути распространения тепла, и идеи структурной оптимизации, позволяющей увеличить прочность материала за счет введения структурообразующих минеральных и органических добавок. Введение активных добавок способствует частичному разрыхлению структуры и раздвижке частиц, улучшают условия гидратации вяжущего. Методические приемы, разработанные при реализации этих направлений, применимы для других задач строительного материаловедения.*

Abstract: Methodical foundations related to the design of the energy-efficient building composite materials are considered. The main problem is to provide a heat-insulating properties and strength characteristics of appropriate level required. The solution is based on the percolation theory, allowing to determine the proportion of thermal insulating filler to interrupt most of thermal paths, and ideas of structural optimization, allowing to increase the strength of the material due to the introduction of structure-forming mineral and organic additives. The features of the conductive properties of the composite mixture were investigated using an electrothermal analogy, according to which the thermal conductive properties of the composite mixture obey the same laws as the electrical conductivity. In the electrical modeling of conductivity in a composite material, the conductive particles of a carbon powder were the model of heat conducting components, the heat-insulating filler (perlite) was used as a dielectric component. Physical modeling made it possible to determine the concentration of the filler, at which the electrical resistance of the model mixture and the thermal resistance of the composite under study increases jumpwise. The ratio of the components of the composite material was chosen in accordance with the principle of maximizing the amount of filler and approaching the percolation threshold, while meeting the regulatory requirements for strength. The introduction of active additives promotes the partial loosening of the structure and the separation of the particles, improves the hydration conditions of the binder, and, as a result, increases the strength of the matrix material. This method allows increasing the amount of heat-insulating filler and minimizing thermal conductivity. The methodological techniques developed during the study are applicable to other materials and, in particular, to prospective materials with foamed glass filler. The method of obtaining composite materials with the optimal combination of strength and heat insulation characteristics is presented in the form of an algorithm, which simplifies its application.

Ключевые слова: энергоэффективные строительные композиты, перколяция, структурная оптимизация
Key words: energy-efficient building composites, percolation, structural optimization

Одной из основных задач строительного материаловедения, особенно актуальной для Украины, является создание многофункциональных энергосберегающих материалов различного назначения и, в частности, утепляющих штукатурных составов. Для разработки основных принципов получения энергоэффективных строительных композитов применялись физические и математические модели и аналогии. Основным модельным материалом являлся строительный гипс, при этом учитывалась возможность дальнейшего перехода к вяжущим с лучшими прочностными характеристиками.

Характерной особенностью рассматриваемых материалов являются противоположно направленные требования и ограничения по свойствам: высокая прочность, высокая адгезионная и звукоизолирующая способность, в сочетании с низкой плотностью и теплопроводностью, невысокой стоимостью. Необходимость учета антагонистических требований к свойствам осложняет подбор составов таких композиционных материалов. Так, добавление теплоизолирующего заполнителя в композитную смесь снижает плотность и теплопроводность, но при этом уменьшаются также адгезионная и другие виды прочностей.

Требуемые уровни критериев качества обеспечиваются оптимальными сочетаниями компонентов смеси. Подбор этого сочетания в строительном материаловедении часто осуществляется эмпирически, с применением статистических методов и планирования эксперимента [1]. Разработка методики выбора рецептуры энергоэффективных материалов, базирующейся на результатах теории перколяции [2,3] и идеях структурной оптимизации [4,5], составляет основную задачу исследования.

Принципы формирования и оптимизации структуры теплоизоляционных материалов рассматриваются применительно к штукатурным материалам на основе гипса. В качестве основного теплоизолирующего заполнителя применялся перлитовый порошок. В качестве добавок, модифицирующих структуру материала, рассматривались микросферы [6], метакаолин, акрил-стироловый латекс.

В предварительных модельных экспериментах использовано соответствие между электрической и тепловой проводимостью. Задачей эксперимента было установление соотношения проводящей и изолирующей среды в опытных образцах, при котором материал скачкообразно изменяет свои электрические свойства (перколяционный скачок сопротивления). Используя электротепловую аналогию, можно предположить, что при соответствующих соотношениях компонентов материал из теплопроводного превращается в эффективный теплоизолятор.

В качестве изолятора применялся перлит-порошок, проводником служил мелкодисперсный угольный порошок, моделирующий сплошную среду. Исследование характера зависимости сопротивления от объемной доли вводимого изолятора позволило определить значение перколяционного порога, который для рассматриваемых материалов составил 80-85 объемных процентов изолирующего компонента (рис.1), что приблизительно соответствует значениям, предсказываемым теорией перколяции [2].

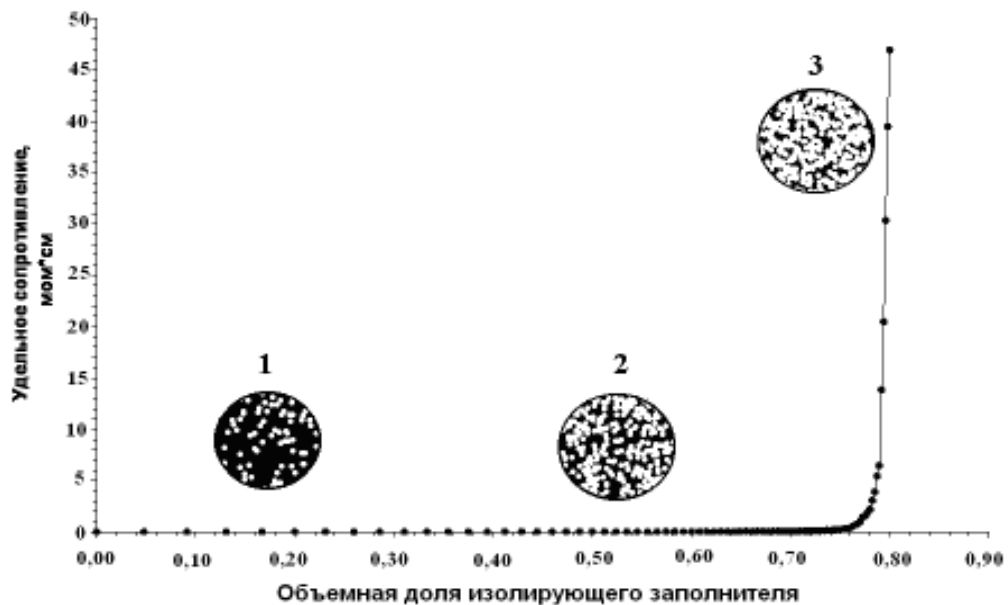


Рис.1. Перколяционный скачок проводимости в двухкомпонентной смеси «проводящая среда – изолятор»; 1–концентрация изолирующих частиц (светлых) мала, условия протекания выполняются (темная среда), смесь имеет высокую электропроводность; 2–средняя (~60%) концентрация изолирующих частиц, приближение к перколяционному порогу, 3– концентрация изолирующих частиц велика, проводящие пути прерваны, проводимость смеси мала.

Теплофизические измерения различных порошкообразных смесей, состоящих из теплопроводящих и теплоизолирующих компонентов, показали, что для теплопроводности (в отличие от электропроводности) не характерен подобный скачок. Вместо него наблюдается плавный переход в области перколяции, что объясняется сравнимыми значениями коэффициентов теплопроводности рассматриваемых компонентов [7]. Тем не менее, наличие такого перколяционного перехода позволяет определить максимальное количество заполнителя, при котором материал становится теплоизолятором.

Основные принципы организации структуры теплоизоляционного материала таковы:

1. Теплоизолирующий заполнитель вводится в композитную смесь в максимально возможном количестве, обеспечивающем при этом нормативный уровень прочности.
2. Введение структурообразующей добавки, в частности, 5-10% микросфер, улучшает прочностные характеристики материала на 50-60% и позволяет вводить в смесь дополнительное количество теплоизолирующего компонента [8].

Логика проектирования теплоизолирующего материала схематически иллюстрируется на р

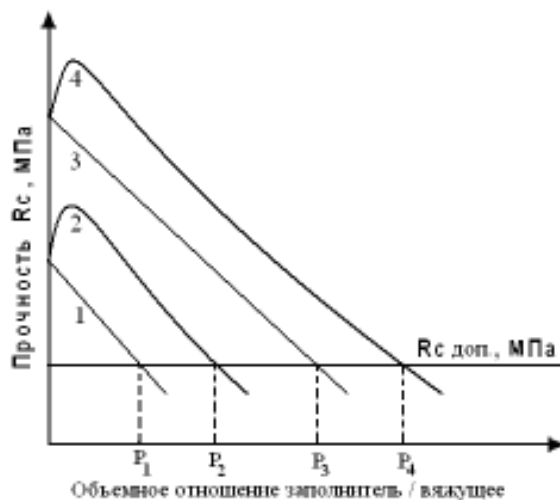


Рис.2. Схема подбора рациональных соотношений «теплоизолирующий наполнитель - вяжущее»

Добавление теплоизолирующего заполнителя, например, перлита, в случае низкопрочного вяжущего, например, строительного гипса, в отсутствие добавки приводит к быстрому снижению прочности (рис. 3, кривая 1) материала до минимально допустимого уровня R_c доп., чему соответствует некоторое отношение перлит/гипс P_1 . На этом возможности улучшения теплоизолирующих свойств материала 1 истощаются. При введении минеральной структурирующей добавки наблюдается прирост начальной прочности материала (кривая 2). Допустимая прочность обеспечивается при большей доле заполнителя P_2 , следовательно - меньшей теплопроводности состава. Переход к высокопрочному вяжущему позволяет повысить критическую концентрацию заполнителя до значения P_3 (кривая 3). Максимально возможное количество заполнителя P_4 , соответствующее заданной прочности, можно ввести в смесь при использовании структурообразующей добавки (кривая 4).

В качестве заполнителей рассматривались гранулы вспененного полистирола, пемза, топливные шлаки, вермикулит и более мелкие – перлит, известняковая мука, зола ТЭС [9]. Необходимым условием их применения являются малая плотность и теплопроводность, химическая устойчивость и экологическая безопасность. В качестве вяжущего могут выступать как традиционные материалы – гипс, цемент, так и сложные их сочетания, например водостойкие гипсоцементнопуццолановые вяжущие [10].

Одним из компонентов, предложенным в качестве заполнителя для получения энергосберегающих композиций согласно приведенной выше методике, является измельченное пеностекло (отходы производства) – материал низкой плотности, поры которого образуют замкнутую ячеистую структуру [10] (рис.3,а).

Свойства композиционного материала, получаемого на его основе (рис. 3,б), могут быть оптимизированы в согласии с рассмотренными выше принципами. Применение высокопрочного гипсового вяжущего позволяет увеличить объемное содержание частиц пеностекла и приблизиться к перколяционному порогу по теплопроводности, сохраняя, однако, нормативный уровень прочности. Этот эффект усиливается введением органических и минеральных добавок, влияющих, в частности, на процессы формирования границ раздела вяжущее-заполнитель [12, 13].

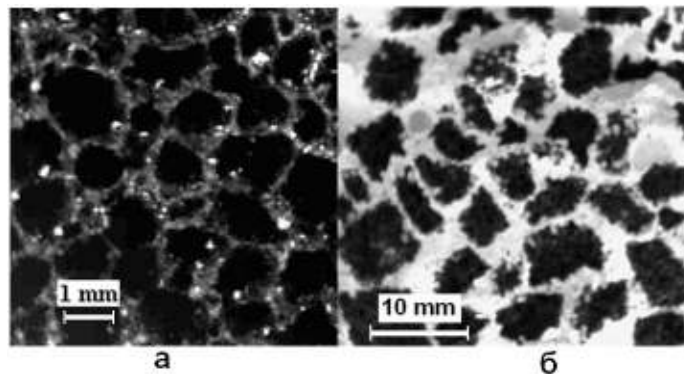


Рис.3. Эффективный наполнитель для энергосберегающих материалов – гранулированное пеностекло (а) и гипсовый образец с включениями пеностекла (б)

Рассмотренная методика является универсальной для синтеза энергоэффективных строительных композиций различного назначения.

Выводы:

Экспериментально выявлена существенная роль перколяционных явлений в формировании теплоизоляционных свойств материалов. Вторым по значимости является фактор оптимальной структуры, управлять которым можно за счет введения соответствующих структурообразующих добавок. Последовательный учет и оптимизация этих двух факторов являются перспективным путем для синтеза строительных материалов с улучшенными теплозащитными свойствами и, в частности, композиционных материалов с заполнителем в виде измельченных отходов производства пеностекла. Методика получения композиционных материалов с оптимальным сочетанием прочностных и теплоизоляционных характеристик представлена в форме алгоритма, что упрощает ее применение.

Литература

1. Вознесенский В.А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. - К.: Будівельник, 1989. - 226 с.
2. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич — М.: Едиториал УРСС, 2002. - 112 с.

3. Керш В.Я. Синтез гипсовых композитных материалов на основе теории перколяции / В.Я. Керш, А.В. Колесников, Д.В. Керш // Сухие строительные смеси, М.- № 3. - 2015. - С. 41- 43.
4. Kersh, V. Structurally-Oriented Design of the Heat Insulation Plastering Material / V. Kersh, A. Kolesnikov, T. Lyashenko, M. Pidkapka // No: Proceedings of REHVA Annual Conference 2015, Latvija, Rīga, 6.-9. maijs, 2015. Rīga: RTU PRESS, 2015, 241.-244.lpp. ISBN 978-9934-10-685-9
5. Керш В.Я. Оптимизация структуры и свойств теплоизоляционных композитов на основе их дискретных моделей / В.Я. Керш, А.В. Колесников, А.В. Фощ // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2013. - Вип. №51. - С. 256-260.
6. Drozhzhin, V.S. Cenospheres. Properties and diagnostics methods / V.S. Drozhzhin, I.V. Pikulin, G.G. Savkin and others // Proceedings SWEMP 2002, Cagliari, Italy. - 2002. - P. 1059.
7. Mamunya Y. P. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders / Y. P. Mamunya, V.V. Davydenko, P. Pissis, E. V. Lebedev // European polymer Journal, 38, 2002, 1887-1897 p.
8. Lyashenko T. Modelling the effect of composition on the properties of gypsum concrete containing cenospheres / T. Lyashenko, V. Kersh, D. Kersh // Proc. 18 Ibausil. - Weimar (Germany), 2012. - V. 1. – P. 1-0416-0423.
9. Дворкин Л.И. Справочник по строительному материаловедению / Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. - М.: Ифра-Инженерия, 2010. – 472 с.
10. Довгань И.В. Статистическое исследование поровой структуры теплоизоляционных композитов / И.В. Довгань, В.Я. Керш, А.В. Колесников, С. В. Семенова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури - 2015.- № 60.- С. 86-90.
11. Керш В.Я. Физико-химические основы рационального выбора компонентов теплоизоляционного материала / В.Я. Керш, А.В. Колесников// Вісник ОДАБА.- Одеса: «Зовнішрекламсервіс», 2013.- № 50 (1).- С. 125-130.
12. Дудар І.Н. Термосилова технологія бетону/ І.Н.Дудар. Універсум-Вінниця, 2001.-45 с.

УДК 69.059

ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕПЛОВА МОДЕРНІЗАЦІЯ ГІМНАЗІЇ №5, М. ОДЕСА

**Безбах І. В., канд. техн. наук, доцент,
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса
Чабанюк В.Р., Воронко О. Ю., Супрунець Є. М.
учні кл. 11, гімназія №5, м. Одеса**

ENERGY RESEARCH AND THERMAL MODERNIZATION GYMNASIUM №5, ODESSA

**Bezbakh I.V., Cand. Tech. Sciences, associate professor
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa
Chabanyuk V.R., Voronko O.Yu., Suprunets E.M.
Students cl. 11, gymnasium № 5, Odessa**

Анотація: Виконано енергоаудит гімназії №5, м. Одеса. Обґрунтовано систему заходів для зниження енерговитрат.

Abstract: The energy audit of the gymnasium №5, Odessa is complete. The system of measures for reduction of energy costs is substantiated.

Вступ.

Низькі ціни на паливо протягом ряду десятиліть сформували в Україні зневажливе відношення до теплової енергії і до всього комплексу питань, пов'язаних із її використанням. Низькі ціни на паливо і відсутність конкуренції не стимулювали створення високоефективного і надійного устаткування світового рівня.

Суттєве зростання світової економіки та рівня життя мешканців розвинутих країн у другій половині 20-го і на початку 21-го століть супроводжувалось стрімким зростанням видобутку та споживання паливно-енергетичних ресурсів. В розвинутих країнах енергоемність життя подвоюється кожні 12 років. Споживання енергії однією людиною за рік досягає 10 т. умовного палива.

Проблеми розвинутих країн ніяким чином не оминули Україну. На сьогодні енергоемність економіки України у 5...6 разів вище, ніж в США та Європі, у 7 разів вище, ніж в Японії. Опалення 1 кв. м. приміщень потребує у 2 рази більше енергії, ніж в США і у 3 рази більше ніж в Швеції. До 40% національного бюджету витрачається на закупівлю енергоносіїв, а близько 20% – на теплопостачання. Без вирішення проблем ефективного використання енергії стає неможливим своєчасна виплата зарплатні та матеріальної допомоги, розвиток соціальної інфраструктури міст і селищ країни, успішне проведення реформи ЖКГ [1].

Мета та методи досліджень.

Метою досліджень було провести енергоаудит гімназії №5, вибрати й обґрунтувати заходи для зниження енерговитрат. Завдання наукової роботи полягає в дослідженні та розрахунку заходів необхідних для зниження енерговитрат гімназії №5, м. Одеса, вул. Малиновського, 29-а.

Предмет досліджень: втрати теплоти від споруди у навколишнє середовище. Методи досліджень: проводився літературний пошук та аналіз існуючих у світі заходів по зменшенню витрат енергії на опалення. Проводилися безпосередні вимірювання розмірів гімназії, приміщень, товщини стіни та температури в приміщеннях, проводилась тепловізійна діагностика споруди.

Прилади, що використовувалися.

1. Тепловізор Testo 875-1 - професійний прилад для безконтактного виміру температури поверхні різних об'єктів або компонентів методом термографії в діапазоні від -20 до +280 °C.
2. Високоточна лазерна рулетка далекомір Speziallaser R30 eXtremale призначена для робіт в умовах будівництва як у приміщенні, так і на вулиці. Арсенал функцій включає: вимірювання відстані, площі й об'єму, обчислення висоти, безперервний вимір (треккінг) і ін. Дальність робіт до 30 метрів із припустимою погрішністю не більше 2.0 мм (на всій довжині).
3. Фотокамера Samsung Galaxy S6 / S6 Edge: 16 Мп, апертура f/1.9-2.2, розмір матриці 1/2.6", розмір пікселя – 1,2 мкм.

Результати тепловізійної діагностики споруди. Більшість теплових втрат будинку непомітні неозброєним поглядом. Проявляють вони себе лише в підвищених витратах на опалення, про які споживач звичайно не підозрює. Як правило, це зайві теплові втрати. Вони з'являються в результаті неправильного використання опалювальних приладів, дефектів або інших конструктивних особливостей будинку. Єдиний спосіб довідатися про їхнє існування - виявити за допомогою тепловізора. Для одержання термографічних зображень об'єкта, необхідно, щоб між вулицею й внутрішнім приміщенням був перепад температур у межах 10...15°C. Тому, тепловізійна діагностика будинків провадиться тільки в холодну пору року. Яскраві області на термограмі – місця великих витоків тепла через стіну. Тепловізійне дослідження будинку гімназії проводилося у світлий час доби 7 квітня 2017 року при температурі навколишнього повітря +4 °C. Результати представлено на рис. 1,2.

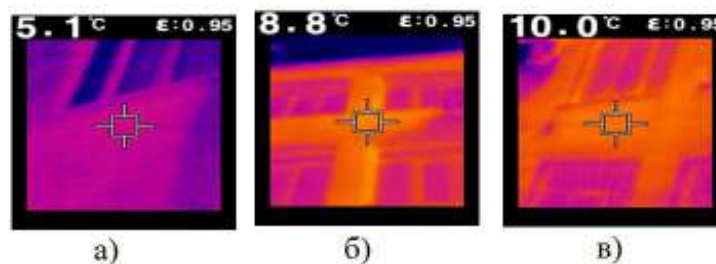
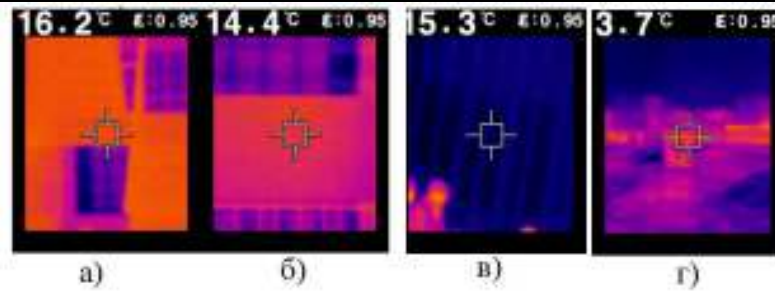


Рис. 1. Результати тепловізійної діагностики фасаду гімназії

На фото тепловізора видно, що температура на деяких поверхнях огорожуючих конструкцій є близькою до температури навколишнього середовища (рис.1, а), що свідчить про задовільний термічний опір, в другому випадку температура фасаду практично вдвічі перевищує температуру навколишнього середовища (рис. 1, б,в), що говорить про високі тепловтрати. Стіни оштукатурені та пофарбовані. Відсутність теплової ізоляції стін зумовлює наднормові теплові втрати та теплові мости. У кутових приміщеннях фасаду на стиках (між ними) спостерігаються підвищенні теплові втрати.

Крім того, проведено діагностику внутрішніх приміщень гімназії, даху, сходових прольотів (рис. 2).



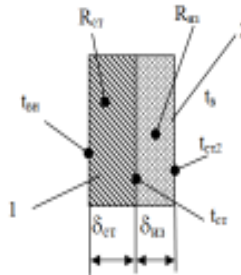
а, б – сходові прольоти, в – приміщення класу, г – дах

Рис. 2. Результати тепловізійної діагностики приміщень та даху гімназії

Таким чином отримано можливість визначити кількість теплоти, що втрачається безпосередньо від кожної огорожуючої конструкції, розрахувати термічні опори огорожуючих конструкцій.

Обробка результатів дослідів.

Визначаємо приведений термічний опір стіни як опір складної системи (рис. 3). Термічний опір складної системи (наприклад, багатошарової теплової ізоляції) дорівнює сумі термічних опорів її частин.



1 – огорожуюча конструкція, 2 – теплова ізоляція

Рис. 3. Схема огорожуючої конструкції

Кінцевою метою розрахунку було визначення експлуатаційних витрат та строку окупності для різних типів ізоляційних матеріалів, які планується застосувати на об'єкті.

В якості вихідних даних використано температури внутрішньої ($t_{\text{вн}}$, °C), зовнішньої поверхні ($t_{\text{ст}}$, °C) огорожуючої конструкції та температура навколишнього середовища ($t_{\text{в}}$, °C), що були виміряні при проведенні тепловізійної діагностики об'єкту. Також було виміряно товщину огорожуючої конструкції ($\delta_{\text{ст}}$, м). Коефіцієнти теплопровідності стінки ($\lambda_{\text{ст}}$, Вт/(м К)) теплової ізоляції ($\lambda_{\text{из}}$, Вт/(м К)), вартість теплової ізоляції ($K_{\text{из}}$, грн/м²) обрано за типом матеріалу із літературних джерел [3].

Рекомендований термічний опір стінки ($R_{\text{днб}}$, м² К / Вт) обрано згідно вимогам ДНБ [2].

Знаючи температури внутрішньої й зовнішньої поверхні й уважаючи тепловий режим сталим визначено термічний опір стін. У результаті розрахунків одержано, що приведений термічний опір стін становить 0,838 (м²·К)/Вт, нормативне значення згідно ДБН В.2.6-31:2006 - 3,3 (м²·К)/Вт. Наведений опір огорожуючої конструкції, не відповідає нормативним показникам.

Термічний опір теплової ізоляції визначено як різницю між нормативним термічним ($R_{\text{днб}}$) опором і опором стінки ($R_{\text{ст}}$). Температуру поверхні ізоляції ($t_{\text{ст2}}$) визначено з рівності питомих теплових потоків (рис. 4). Коефіцієнт тепловіддачі від неізольованої та ізольованої ділянки, Вт визначено за формулою:

$$\alpha = 9.76 \cdot 0.07 \cdot (t_{\text{ст2}} - t_{\text{в}}) \quad (1).$$

Після чого визначено площу поверхні ділянки та розраховано теплові втрати від неї. Обрано час експлуатації (τ , с) та тариф підприємства на теплову енергію (Z , грн/Гкал). В останньому блоці визначено експлуатаційні витрати ($З$, грн.) при роботі неізольованої ділянки та ізольованої ділянки огорожуючої конструкції.

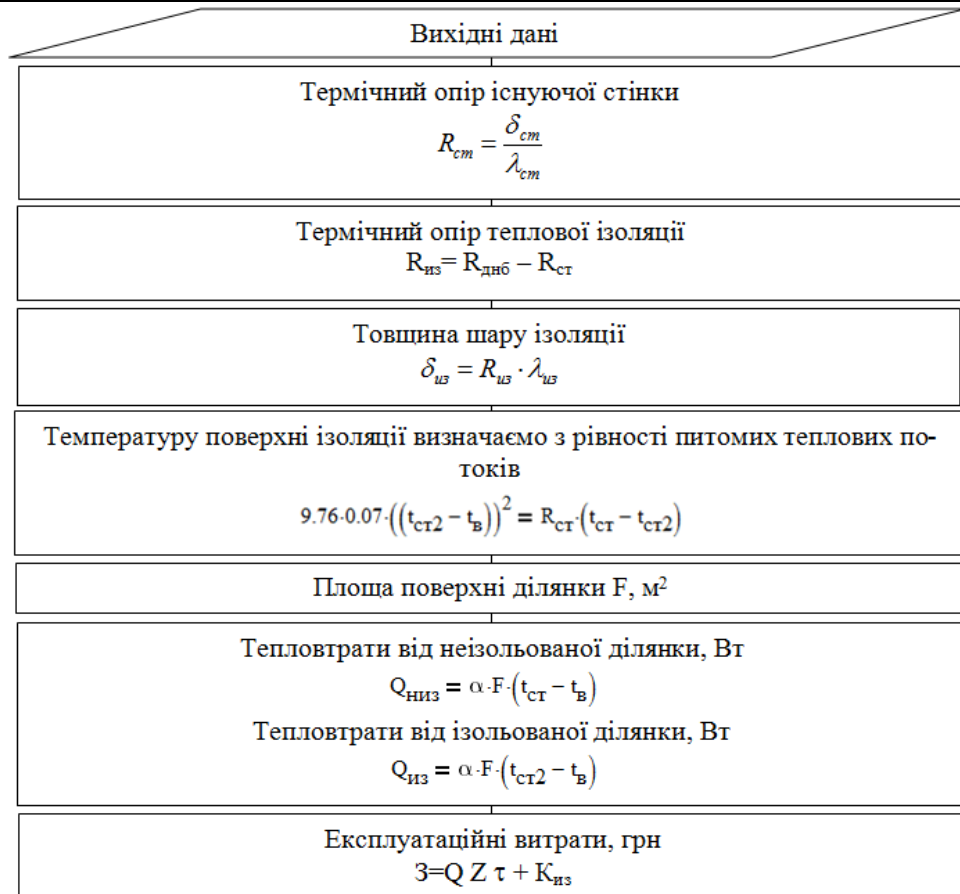


Рис. 4. Алгоритм розрахунку експлуатаційних витрат на ізоляцію

На останньому етапі представляємо графічну залежність експлуатаційних витрат (З, грн.) від часу експлуатації (τ, с) та визначаємо час експлуатації, починаючи з якого обраний тип теплової ізоляції буде економічно більш вигідним.

Висновки.

Аналіз проведеної тепловізійної діагностики гімназії показав проблемні ділянки стін, тепловтрати яких вищі.

Розрахунок термічних опорів показав, що приведений термічний опір стін становить 0,838 (м²·К)/Вт, що не відповідає нормативним показникам.

Базуючись на даних розрахунків та вимірювань складено практичний проект, щодо зменшення витрат енергії для гімназії №5.

Література

1. Бурдо О. Г. Стратегія совершенствовання енерготехнологій в умовах кризи
2. Бурдо О. Г., Светличный П.И., Зыков А.В. Интегровані технології та енергозбереження 3'2009
3. ДСТУ В.2.6.-31:2006 «Конструкція будівель і споруд Теплова ізоляція будівель»
4. <http://aerocrete.com.ua/behaviour/>

УДК [664.78:631.576.4]:[66.2.7:57]

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АГРОПЕЛЕТ

Хоренжий Н.В., к.т.н., доц., Лапінська А.П., к.т.н., доц. Перетяка С.М., к.т.н., доц., Дєтков Г.Г., студ.ОКР «Спеціаліст» ф-ту ТЗХКВКіБ

PROSPECTS FOR THE USE OF WASTE OF MANUFACTURING MANUFACTURE AS RAW MATERIALS FOR MANUFACTURING AGRICULTURAL PRODUCTS

Khorenzhyy N.V., Ph.D., Associate professor, Lapinska A.P., Ph.D., Associate professor, Perttiaka S.M. Ph.D., Associate professor, Detkov G.G., student
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

Анотація: У статті аналізується структура виробництва зернових в Україні, виявлено, що при переробці зерна в крупи утворюється значна частина вторинних матеріальних ресурсів (борошна та лушпиння). Тому важливо використовувати лушпиння зернових як сировину для виробництва біопалива. Метою роботи є розширення ресурсної бази біопалива за рахунок відходів виробництва зернових. Для досягнення цієї мети формулюються цілі дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес переробки відходів зернових рослин, режимів окремих технологічних процесів, зокрема, підготовка сполучного матеріалу. Предметом дослідження є мука і лушпиння вівса та ячменю, що зв'язують речовини (ячмінна паста). Визначено фізичні властивості відходів від переробки злаків. Встановлено, що лушпиння, незалежно від його виду, володіє властивостями: низькою текучою здатністю, великим кутом навалюного схилу, невеликою об'ємною масою в порівнянні з борошном. Сировина для виробництва біопалива суттєво відрізняється за розмірами частинок, насипною щільністю та питомою вагою, вологістю, міцністю частинок матеріалу, хімічним складом сировини, тому рекомендується збільшення тиску на калорійність палива. Проаналізовані різні способи виробництва біопалива, було доведено, що існують також недоліки брикетів і гранул, отриманих без зв'язування речовин, одним з яких є проблема міжміського транспорту, внаслідок чого значна кількість стисненого біопалива знищується через збільшення вологості та, як наслідок, теплотворних властивостей. Паливні гранули виготовляються головним чином без додавання зв'язуючого матеріалу, тоді як для виробництва брикетів з поліпшеними показниками якості використовуються різні добавки та в'язучі матеріали. Було запропоновано використовувати як зв'язувальний агент крохмаль-сировину - борошно. На підставі експериментальних досліджень було доведено, що найбільш ефективним способом є приготування пасты з ячменю та / або овсяної муки з вмістом сухої речовини 15% з наступним введенням 5-10% в біопаливо. Тепло згоряння отриманих гранул становить 10-12 МДж / кг, температура горіння 540 ° С.

Abstract: The article analyzes the structure of production of cereals in Ukraine, found that when processing grain in the croup formed a significant part of the secondary material resources (flour and husks). Therefore, it is important to use the husks of cereals as raw materials for biofuel production. The aim of the work is to expand the biofuel resource base at the expense of cereal production waste. To achieve this goal, research objectives are formulated. The object of the study is the technological process of waste processing of cereal plants, modes of individual technological processes, in particular, preparation of a binder. The subject of the study is a fly and husk oats and barley, binding substances (barley paste). The physical properties of waste from processing cereals are determined. It has been established that the husk independently of its species has properties: low flowability, a large angle of the bulk slope, a small bulk mass in comparison with the flour. The raw material for biofuel production is significantly different in particle size, bulk density and specific gravity, humidity, strength of the material particles, chemical composition of raw materials, so pressing is recommended to increase the calorific value of fuel. Various methods of biofuel production have been analyzed, it has been shown that there are also shortcomings of briquettes and pellets obtained without binding substances, one of which is the problem of long-distance transportation, during which a significant amount of pressed biofuel is destroyed due to an increase in humidity and, as a consequence, calorific properties. Fuel pellets are mainly produced without the addition of a binder, while for the production of briquettes with improved quality indicators, various additives and binder are used. It was suggested to use as a binding agent starch-containing raw materials - a flour. On the basis of experimental studies, it has been proved that the most effective way is to prepare a paste from barley and / or oat flour with a dry matter content of 15%, with its subsequent introduction of 5-10% into biofuel. The heat of combustion of the obtained pellets is 10-12 MJ / kg, the burning temperature is 540 ° C.

Ключові слова: біопаливо, відходи крупозаводів, лузга круп'яних культур, зв'язуюча речовина, пелети, брикети

Keywords: biofuel, waste of cereal plants, husk of cereals, binder, pellets, briquettes

Відомо, що енергоемність харчових виробництв в Україні була і залишається найбільшою в Європі [1, 2]. Причина цього криється не тільки у марнотратному ставленні громадян до будь-якого виду та джерела енергії, але й у використанні у технологічних процесах фізично зношеного та морально застарілого

енерговитратного обладнання, у тому числі на зернопереробних підприємствах [3, 4]. Для України біоенергетика є одним із стратегічних напрямків розвитку сектору відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), враховуючи високу залежність країни від імпортованих енергоносіїв, в першу чергу, природного газу, і великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії [5, 6].

Щорічно в Україні для виробництва енергії використовується близько 2 млн. т у.п./рік біомаси різних видів, при чому основна частка – деревини складає майже 80 %, 2 % – соломи злакових культур та 15,8 % лушпиння соняшнику. Таким чином, сировиною для виробництва біопалива є відходи сільського господарства (солома, полова, стебла кукурудзи, соняшника, тощо), виноградарства (виноградні вичавки), деревопереробних (тирса), оліє-екстракційних (соняшникове лушпиння) та круп'яних підприємств.

За останні десять років у середньому в Україні вироблялося 352 тис. тонн круп на рік, у 2014-му цей показник становив 350 тис. тонн [7], при чому при переробці зерна в крупу утворюються побічні продукти в основному у вигляді мучки та лузги. Так, при переробці проса в пшоно утворюється як побічний продукт 7,5% мучки та 15,5 % лузги, при переробці пшениці в крупу близько 30% мучки, ячменю в ячну крупу - 18% мучки, а в перлову крупу - 40% мучки та 7 % лузги, при переробці гречки в крупу - 3,5% мучки та 20,8 % лузги, вівса – мучки 4 – 16 %, а лузги – 26 – 27 %, гороху – 6 % лузги та 6,5 – 26,5 січки та мучки разом. Але рівень використання цих вторинних сировинних ресурсів у якості джерела для біопалива недостатньо високий.

Лузгу використовують при виробництві кормових сумішей для жуйних тварин; у якості наповнювача у вологих мішаних комбікормах для качок, гусей; як підстилку на тваринницьких комплексах; як паливний ресурс в котельнях; для виробництва будівельних матеріалів (пресованих плит, блоків, утеплювачів), целюлозовмісна сировина для гідролізу з отриманням широкого спектру продуктів, сировина для виробництва кормових продуктів методом біоконверсії, сировина для виробництва тари. Масова частка лузги серед відходів найбільша: 4 – 40 % в залежності від виду крупів. Але лузга рису має низьку теплотворну здатність, високу абразивність (через високий вміст діоксиду кремнію), що пошкоджує робочі органи машин. До складу лузги входить 28 – 30 % неорганічних речовин, що не припустимо для біопалива.

Таким чином актуальним є використання лузги круп'яних культур у якості сировини для виробництва біопалива. **Метою роботи** є розширення сировинної бази біопалива за рахунок відходів круп'яного виробництва. Для досягнення поставленої мети визначені наступні **задачі дослідження**:

- дослідити фізичні властивості відходів переробки круп'яних культур ;
- обґрунтувати використання мучки у якості зв'язуючої речовини (ЗР),
- розробити та обґрунтувати композицію ЗР на основі мучки,
- дослідити вплив ЗР на основі мучки на якість гранул.

Об'єкт дослідження є технологічний процес переробки відходів круп'яних заводів, режими окремих технологічних процесів, зокрема підготовки ЗР. **Предмет дослідження** - мучка та лузга вівсяна і ячмінна, ЗР (ячмінний клейстер).

Фізичні властивості відходів переробки круп'яних культур (тобто – сировини) відіграють важливу роль, оскільки вони визначають умови зберігання, особливості побудови ТП, режими роботи обладнання, витрати електроенергії, кількісні та якісні показники готової продукції.

Форма і розміри частинок сировини, що характеризують їх крупність (довжину), визначають вибір робочих органів та режими роботи обладнання для очищення, сортування і подрібнення. В залежності від крупності частинок відповідно змінюються й фізичні властивості сировини.

Сипкість матеріалів - складна комплексна характеристиками, що залежить від багатьох факторів: щільності, гранулометричного складу, форми і стану поверхні частинок. Сипкість визначає мінімальну швидкість прокатки в процесі безперервного пресування.

Чим краще сипкість порошку, тим легше його прокатка через отвори матриці, тим більш щільною і міцною буде гранула після пресування. Основними факторами, що визначають сипкість порошкоподібних матеріалів, є тертя і зчеплення частин між собою, що утрудняють їх взаємне переміщення, тобто когезійні сили взаємодії між частинками.

Об'ємна маса залежить від ступеню укладання та розміру частинок сировини, її хімічного складу, масової частки вологи та засміченості; та впливає на щільність укладання частинок в одиниці об'єму, тобто на місткість силосів і бункерів для зберігання, на продуктивність технологічного та транспортного обладнання

Аналізуючи отримані результати експериментального дослідження (табл.1), можна зробити висновок, що існує прямо пропорційна залежність між крупністю частинок і кутом насипного ухилу , та зворотно пропорційна між крупністю частинок сировини і її об'ємною масою.

Таблиця 1. Фізичні властивості відходів

Найменування	Фізичні властивості

Одеська національна академія харчових технологій
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

	Масова частка вологи, %	Середньозважений розмір частинок, мм	Об'ємна маса, кг/м ³	Кут насипного ухилу, град	Сипкість, см/с
Лузга ячмінна	11,5	1,3	180-190	70-80	16
Лузга вівсяна	12,2	1,54	130-200	80-90	12
Мучка ячмінна	11	0,70	390-460	45-55	17
Мучка вівсяна	14,5	1,45	300-400	50-60	17
Мучка горохова	14,1	1,6	400-470	45-50	18

Також результати експериментальних досліджень показують, що лузга незалежно відової її приналежності має властивості: низьку сипкість, великий кут насипного ухилу, невелику об'ємну масу у порівнянні з мучкою. Зрозуміло, що єдина прийнятна форма готової продукції – пресована (гранульована та брикетована).

Досліджувана сировина для виробництва біопалива суттєво різниться за розмірами частинок, насипній і питомій вазі, вологості, міцності частинок матеріалу, хімічним складом сировини. Тому доцільно розробити таку технологію, яка б максимально підвищила теплотворну здатність палива – шляхом пресування.

Автори [8] розробили спосіб приготування твердого біопалива брикетуванням, який включає подачу рослинних відходів вологістю 4-12 % і фракційним складом 2- 10 мм, їх пресування, наступне формування і ділення, при цьому брикети піддають додатковій термообробці, причому формування проводять безперервно і одночасно із термообробкою при температурі 150-250 °С в залежності від типу сировини.

Відомий спосіб виготовлення екологічно чистих пелет твердого палива, що їх виготовляють із здрібненої деревної та іншої органічної сировини шляхом пресування у гранули циліндричної форми [9]. Органічною сировиною, що її використовують у відомих пелетах, окрім деревної сировини, є стовбури кукурудзи і соняшнику, очерет, трава, листя дерев (зокрема, хвойних порід), відходи тютюнового виробництва, тютюновий пил, зрізи тютюну, стебла проса, солома зернових тощо. Кожен вид сировини через свої різні фізичні властивості потребує значних зусиль на їх здрібнення, а отримана біомаса має різну щільність та пружність, що ускладнює утримання їх фракції у єдиній конструкції, навіть після пресування. Виготовлені за відомим способом пелети мають нестійку форму, і, у результаті механічного впливу під час маніпуляцій з ними, легко руйнуються.

Однак потрібно мати на увазі, що існують і недоліки брикетів і пелет, отриманих без використання зв'язуючих речовин, одним з яких є проблема транспортування на великі відстані, в ході якого відбувається руйнування значної кількості пресованого біопалива за рахунок підвищення вологості і як наслідок зниження їх теплотворних властивостей [10].

Паливні гранули (пелети) в основному виробляються без додавання зв'язуючих речовин (ЗР), в той час як для отримання брикетів з поліпшеними показниками якості використовуються різні добавки і ЗР. Більшість стандартів різних країн забороняють застосування ЗР для виготовлення брикетів (пелет), оскільки містять жорсткі екологічні вимоги щодо викидів (діоксиду вуглецю, оксидів сірки і азоту, сажі та інших токсичних газів) при спалюванні, а також за кількістю золи і її плавкості.

Однак застосування природних, екологічно чистих ЗР дозволить поліпшити технологічні характеристики твердого біопалива і дасть можливість розширити сировинну базу для його отримання.

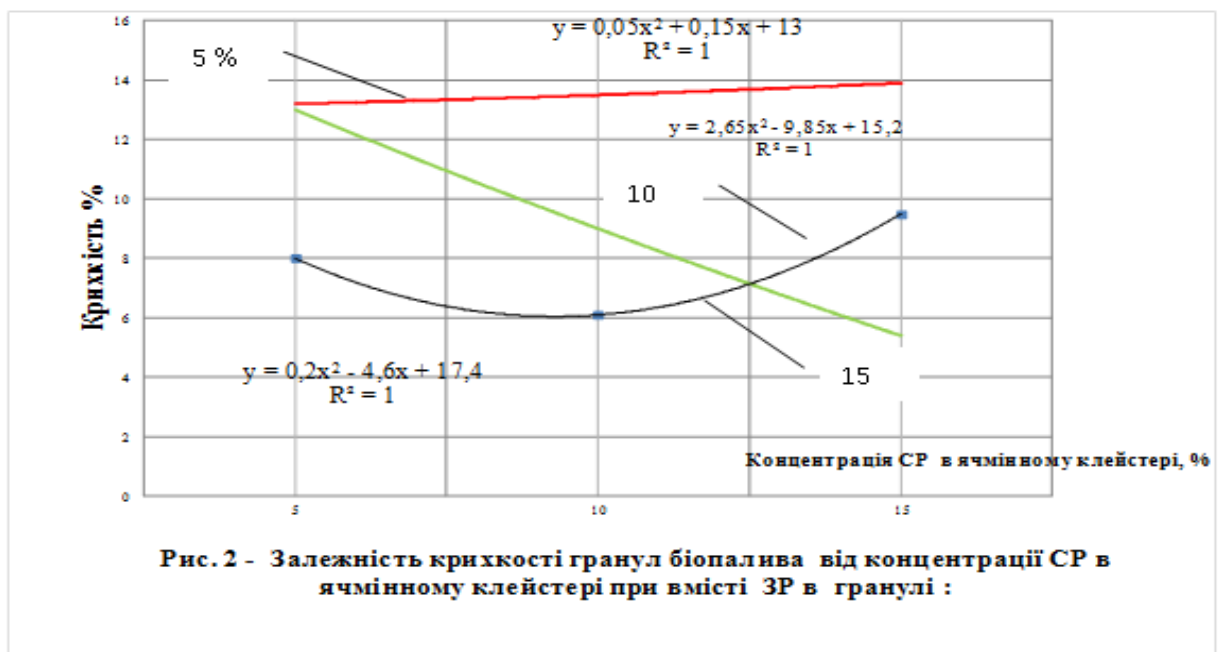
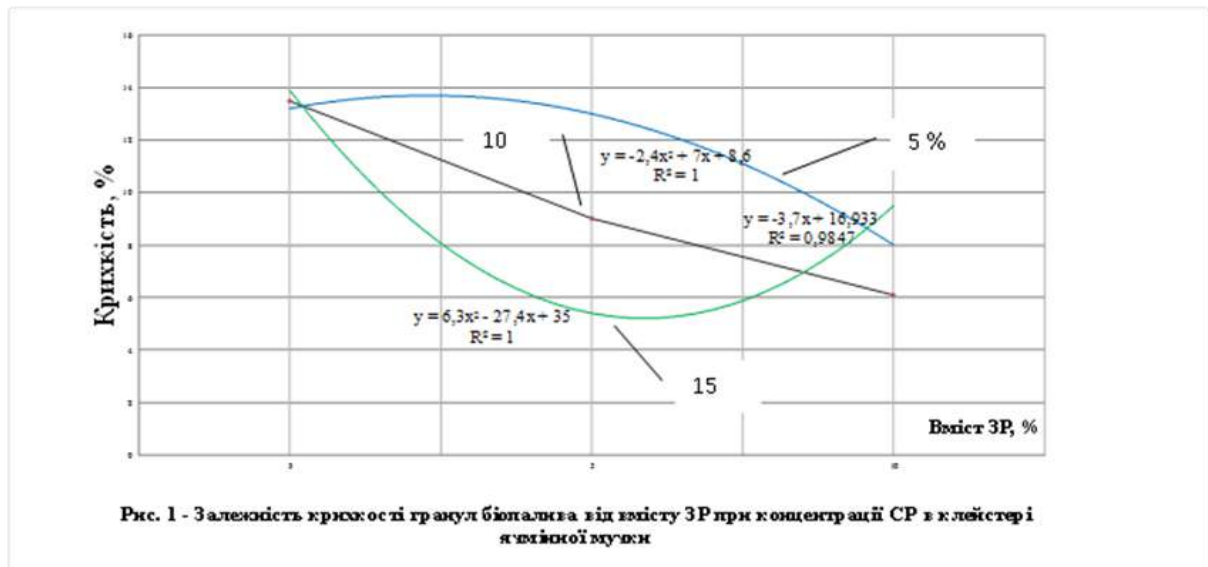
Вибір ЗР є надважливим. ЗР повинна мати високу пресуємість, добру здатність до змішування з іншими компонентами, близьку до інших компонентів суміші сипкість, фізичну та хімічну стабільність, хімічну сумісність з іншими речовинами суміші та задовільну ціну. В якості таких ЗР може бути використаний природний полімер - лігнін. Лігнін - аморфна речовина від світло-кремового до темно-коричневого кольору (в залежності від способу виділення), молекулярна маса розчинних лігнінів від 1 до 150 тис., щільність 1,25-1,45 г / см³. Лігнін проявляє пластичні властивості при підвищеному тиску і температурі, особливо у вологому стані. Авторі [11] вивчили вплив різних добавок і ЗР (порошок кавових зерен, кора, порошок лігніну, тощо) на пресування брикетів з тирси деревини модрина та тюльпанового дерева. Показано, що при використанні в якості ЗР порошку лігніну отримані паливні брикети з високими характеристиками міцності. Tarasov D., Shahi Ch., Leitch M. [12] продемонстрували, що лігнін - дешевий побічний продукт переробки деревини - може змішуватися з крохмалем і гліцерином, даючи більш міцні і пружні матеріали. У процесі подрібнення лігніну утворюються дуже дрібні частинки, що дають хорошу адгезію з крохмалем, білками сої та їх похідними з утворенням просторових структур, що робить їх привабливими для використання в якості ЗР. При гранулювання деревної тирси оптимальної передбачається, за даними компанії California Pellet Mill, температура гранул від 88 до 102 °С. Це пояснюється тим, що має забезпечуватися плавлення лігніну, яке відбувається при 90 °С у відсутності водяної пари, що розриває гранулу [13]. Авторі робіт [14, 15] вивчали вплив крохмалю і гуміарабіку на щільність і теплотворну здатність брикетів з тирси. Встановлено, брикети з високою теплотворною здатністю (33,09 МДж / кг) і щільністю (0,546 г / см³) отримані при використанні в якості ЗР крохмалю.

В результаті використання ЗР при пресуванні отримують паливні брикети з підвищеною гідрофобністю і високою теплою згоряння.

Однак основним недоліком методів отримання твердих біопалив за рахунок застосування в якості ЗР продуктів харчового призначення (крохмалю, борошна), або дорогих добавок-пластифікаторів може привести до збільшення у їх вартості.

Тому запропоновано у якості ЗР використовувати крохмалевмісну сировину – мучку.

Для обґрунтування складу зв'язуючої речовини складено їх модельні суміші з різним вмістом сухої речовини (5, 10, 15 % мучки ячмінної) та досліджено їх якість в залежності від складу композиції та крупності частинок сухої речовини (рис.1, 2).



При вмісті сухих речовин (СР) в клейстері 5 % збільшення відсотку введення ЗР до 10 % призводить до зменшення крихкості на 43 %. Концентрована 15 % суміш із збільшенням норми введення ЗР до 5 % забезпечує зростання міцності гранул на 64 %. Проте подальше збільшення відсотку введення до 10 % призводить до зменшення міцності гранул, що узгоджується із фізичною дією ЗР при надлишковій нормі введення.

Аналіз отриманих даних свідчить про доцільність використання клейстера з вмістом СР 15 % та раціональною нормою введення ЗР 5 %, оскільки це забезпечує найкращі показники якості гранул біопалива.

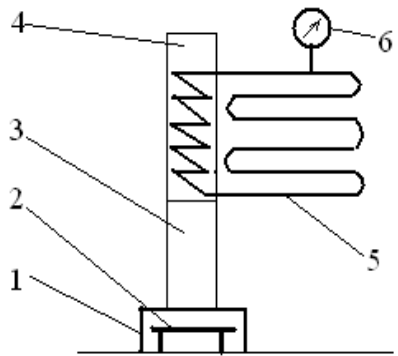


Рис. 4. Експериментальний стенд
1 - камера згорання, 2 - касета для пелет, 3 - скляна труба, 4 - витяжна труба, 5 - двофазний контур, 6 - манометр

Виготовлені пелети спалили в спеціальному експериментальному стенді (рис. 3) [16] та отримали наступні експериментальні дані за відомою методикою [17]. Залишок золи знаходиться в межах 8 – 9 %. Теплота згорання пелет 10 - 12 МДж/кг, температура горіння 540 °С. Це підтверджує ідею про те, що замість відходів, які забруднюють навколишнє середовище, можливо, отримати екологічно чисте паливо. Необхідно додати, що попіл, який утворюється при згорянні, є високоякісним добривом.

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки. Лузга круп'яних культур незалежно відової її приналежності має незадовільні технологічні властивості у порівнянні з мучкою, які у поєднанні із особливостями хімічного складу призводять до незадовільної здатності до пресування. З урахуванням вище сказаного, для забезпечення міцності гранул, зменшення пластичності відходів круп'яних культур (лузги) рекомендовано використовувати в процесі пресування комплексну ЗР на основі мучки вівсяної та ячмінної. Здатність ЗР мучок обумовлена вмістом в них крохмалю, який при високих

температурах клейстаризується. На основі експериментальних досліджень доведено, що найбільш ефективним способом є приготування клейстеру з ячмінної та/або вівсяної мучки із вмістом СР 15 % з подальшим його введенням до складу біопалива у кількості 5 – 10 %.

Література

1. Бевз В. В. Енергозбереження – потенціал розвитку економіки України // Харчова промисловість. — 2010. — № 9. — С. 186–190.
2. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств. – Одесса: Полиграф, 2008. – 244 с.
3. Біоенергетичний потенціал лісостепової та поліської зони України та перспективи його використання: монографія / За заг. ред. д.с.-г.н., проф., член-кор. УААН В.І.Ладики. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2009. – 300 с.
4. Біопаливо (технології, машини і обладнання) / [В. Дубровін, М. Корчемний, І. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З.Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В.В. Криворучко]. – К.: ЦТІ “Енергетика і електрифікація”, 2004. - 256 с.
5. Енергетичний баланс України за 2012 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України №08/4-16/240 від 20.12.2013.
6. Solid Biomass Barometer. EurObserv'ER, December 2013. http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro219_en.pdf
7. Державний комітет статистики України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
8. Патент Росийской Федерации № 2364617 «Способ получения брикетов и установка для изготовления брикетов», опубліковано 20.08.2009, Бюл. № 23
9. Патент України на корисну модель "Екологічно чисті пелети твердого палива" № 69475 від 25.04.2012, Бюл. № 8
10. Галяветдинова Н.Р., Насыбуллина А.Ф. Разработка технологии получения древесных топливных гранул с повышенной энергетической эффективностью // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т.2, № 3-4 (8-4). С. 27-31
11. Sotannde O.A., Oluyeye A.O., Abah G.B. Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of *Azadirachta indica* // Journal of Forestry research. 2010. N 21(1). P. 63 – 67.
12. Tarasov D., Shahi Ch., Leitch M. Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: Review // ISRN Forestry. Vol. 2013, Article ID 876939, 6 p. [electronic resource] <http://dx.doi.org/10.1155/2013/876939>.
13. Stolarski M. J. et al. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass //Renewable energy. – 2013. – Т. 57. – С. 20-26.
14. Lu D. et al. Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders //Biomass and Bioenergy. – 2014. – Т. 69. – С. 287-296.
15. Chou C. S., Lin S. H., Lu W. C. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran //Fuel processing technology. – 2009. – Т. 90. – №. 7. – С. 980-987.
16. Перетяка С. Н., Осадчук П. И. Технология производства пеллет из виноградных выжимок //Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2015. – №. 47 (2). – С. 213-215.
17. Перетяка С. Н. Исследование энергетических характеристик кофейного шлама //Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2011. – №. 39 (2). – С. 345-348.

УДК 663.81

КИНЕТИКА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ГРАНАТОВОГО СОКА В УСТАНОВКЕ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Стоянова А.М., магистрант факультета ЭТОиТД, ОНАПТ,

Драгни Е.И., магистр факультета ЭТОиТД, ОНАПТ

Терземан Е.Ф., инженер факультета ЭТОиТД, ОНАПТ

KINETICS OF CONCENTRATION OF POMEGRANATE JUICE IN BLOCK FREEZE INSTALLATION

Stoyanova AM, graduate student of the Faculty of ETE & TD, ONAFT,

Dragni E.I., Master of the Faculty of ETE & TD, ONAFT

Terzeman E.F., Engineer of the Faculty of ETE & TD, ONAFT

Аннотация. В данной статье приведена специфика гранатового сока и сравнительный анализ разных методов концентрирования. Также показаны итоги работы (исследование кинетики формирования блока льда, зависимости интенсивности процесса кристаллизации от концентрации, уровня температуры и объема продукта и исследование кинетики сепарирования), главным результатом которой стало получение сока с концентрацией 47%, чего не удалось добиться в зарубежных научных исследованиях по криоконцентрированию соков.

Abstract. In this article the properties of pomegranate juice and comparative analysis of different concentration methods are provided. The work results are provided as well (research of ice block forming kinetics, dependency between crystallization process intensity and concentration, temperature level and product volume and research of separation kinetics), the most significant one is juice production with the concentration level of 47%. This was not obtained in foreign scientific researches of juice cryoconcentration.

Ключевые слова: кинетика, концентрирование, гранатовый сок, установка блочного вымораживания.

Keywords: kinetics, concentration, pomegranate juice, block freezing unit.

Введение

Производство концентрированных соков получило широкое развитие во всем мире. Хранение и транспортирование их дает значительную экономию тары, погрузочно-разгрузочных и транспортных средств, позволяет создавать резерв на годы с низким урожаем плодов. Путем концентрирования содержание растворимых сухих веществ в соках можно повысить до 70-75% и соответственно уменьшить объем их по сравнению с натуральными в 5-6 раз. Для перевозки и длительного хранения соки концентрируют до 60-72% [1]. Криоконцентрированием активно занимаются во всем мире, доказательством этому служат множество статей, книг и других работ по данной теме (M. Normohamadpor Omran; M. Kh. Pirouzifard; P. Aryaey; M. Hasan Nejad «Cryoconcentration of Sour Cherry and Orange Juices with Novel Clarification Method; Comparison of Thermal Concentration with Freeze Concentration in liquid Foods», Islamic Republic of Iran; M.A. Sanz-Bobi «Thermoelectricity applied to the cryoconcentration of orange juice», Inst. de Investigacion Tecnologica, Univ. Pontificia Comillas, Madrid, Spain; Forough Khajehi, Mehrdad Niakousari, Mohammad H. Eskandari, Mohammad Sarshar «Production of Pomegranate Juice Concentrate by Complete Block Cryoconcentration Process», Iran; Nathalia D. A. Arriola, Gielen D. Santos, Isabella B. Muñoz, Elane S. Prudêncio, Renata D. M. C. «WATERMELON (Citrulus lanatus) JUICE CRYOCONCENTRATION AND IMPACT ON ITS LYCOPENE CONTENT», Amboni. Department of Food Science and Technology, Federal University of Santa Catarina, Center for Agricultural Sciences, Laboratory of Fruit and Vegetables, Rodovia Admar Gonzaga 1346, Itacorubi, 88034-001 Florianópolis, SC, Brazil).

Актуальность

Влияние гранатового сока на организм человека невозможно переоценить. По своей биологической активности свежевыжатый напиток из граната превышает большинство ягодных и плодовых соков. Он содержит множество органических кислот, центральное место среди которых отводится лимонной кислоте, водорастворимые полифенолы, различные аминокислоты (9 заменимых и 6 незаменимых), сахара. Гранатовый сок зажил славу «короля витаминов». В наибольшем количестве в нем содержатся витамины С и группы В. Кроме этого, в нем есть провитамин А (каротин), Е и РР. Данный напиток также богат микроэлементами, а именно фосфором, железом, калием, кальцием, медью, магнием, кремнием, натрием. Благодаря такому насыщенному составу гранатовый сок улучшает функции кроветворения, нормализует

состав крови и желудочного сока, очищает сосуды. Этот целебный напиток дарит энергию и укрепляет общий иммунитет [2].

Согласно ГОСТ 18192-72 гранатовые соки должны обладать следующими качествами:

- по физико-химическим показателям концентрированные соки должны соответствовать следующим нормам: массовая доля растворимых сухих веществ – не менее 70% как для осветленных, так и для неосветленных соков;

- массовая доля титруемых кислот – не менее 3,5%;

- массовая доля осадка для осветленного сока – не более 0,5% от массы, для неосветленного – не более 1%;

- при разведении концентрированных соков к 1 объему сока добавляют воду в объеме 4,5;

- пищевая и энергетическая ценность 100 г концентрированных соков: углеводы – 65 г, витамин С – 15 мг, энергетическая ценность – 260 ккал [3].

Анализ литературных источников и формулировка проблемы

Концентрирование соков может проводиться путем выпаривания, вымораживания (криоконцентрирования) или с помощью мембран.

Концентрирование желателно проводить таким образом, чтобы продукт претерпевал минимальные изменения. В связи с этим необходимо учитывать изменения, которые могут произойти с компонентами соков при удалении влаги. Так, взвеси и коллоидные вещества с высокой молекулярной массой (пектиновые, белковые и дубильные) при выпаривании оседают на поверхности нагрева и могут вызвать локальный перегрев и пригорание. При концентрировании вымораживанием и с использованием мембран они образуют агрегаты, затрудняющие течение процесса, значительно повышают вязкость концентрата. Сахара могут карамелизоваться и вызвать потемнение вследствие реакции Майяра. Витамины, ферменты, фенольные и красящие вещества чувствительны к теплу и могут подвергаться частичному окислению и изменению, летучие ароматические вещества – удаляться вместе с водяным паром, что приводит к потере характерного фруктового запаха [4].

Теоретической предпосылкой экономичности метода криоконцентрирования является сравнение затрат на отбор теплоты при кристаллизации воды и подвод теплоты для выпаривания. На испарение 1 т воды расходуется $26,0 \cdot 10^5$ кДж теплоты, для кристаллизации 1 т воды не обходимо отвести $3,33 \cdot 10^5$ кДж.

Поэтому, хотя стоимость производства холода примерно в 2 раза выше стоимости производства теплоты, расходы на осуществление фазового перехода при выпаривании выше, так как удельная теплота парообразования значительно больше теплоты кристаллизации. Кроме того, потери в окружающую среду при выпаривании выше [5].

Цель работы и задача исследования

Цель работы: исследование процесса криоконцентрирования гранатового сока.

Задачи исследования:

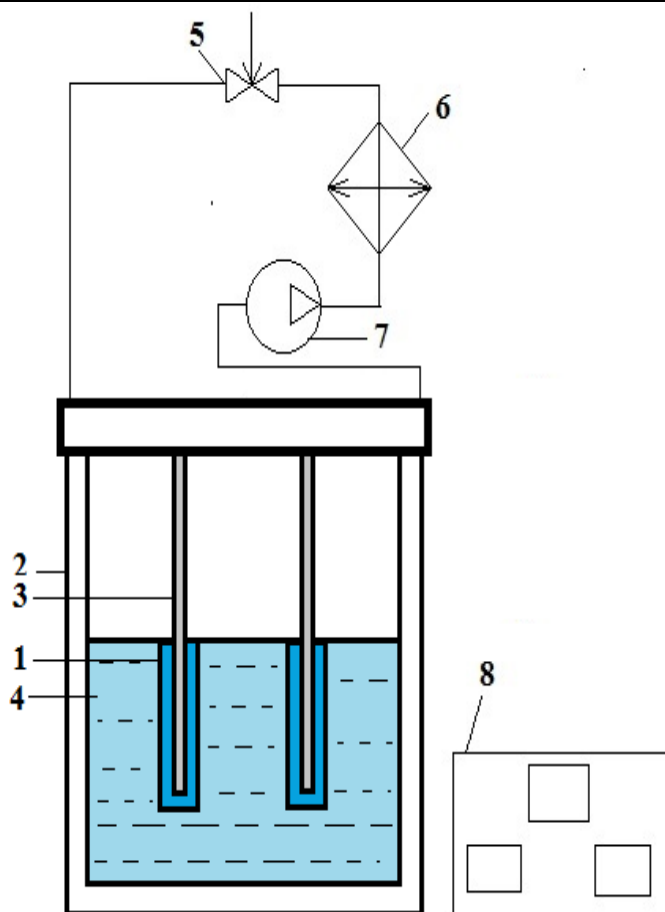
1. Исследование кинетики формирования блока льда.

2. Зависимости интенсивности процесса кристаллизации от концентрации, уровня температуры и объема продукта.

3. Исследование кинетики сепарирования.

Результаты исследования

Исследования проводились на данной установке:



1 – лед; 2 – концентрат; 3 – кристаллизатор; 4 – продукт; 5 – дроссельный вентиль; 6 – конденсатор; 7 – компрессор; 8 – измерительные приборы.

Рис.1 – Схема экспериментальной установки

На первом этапе измерялся рост объема блока льда к единице площади испарителя во времени при разных начальных концентрациях сока. Результаты представлены на рис.2.

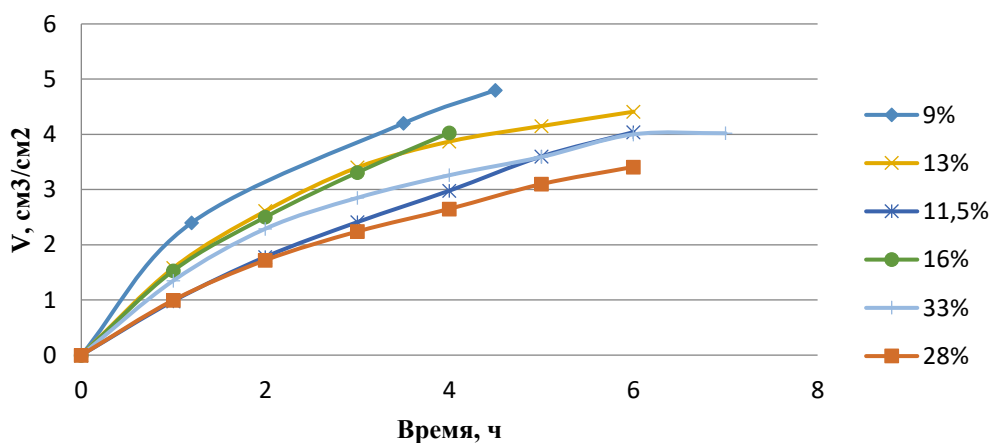


Рис.2 – кинетика формирования блока льда

Влияние на кинетику процесса может оказать температура кипения фреона. Снижение температуры на 3°C увеличивает интенсивность процесса на $0,5 \text{ см}^3/\text{см}^2$. Зависимости удельного объема блока от времени при разных температурах фреона представлены на рис.3.

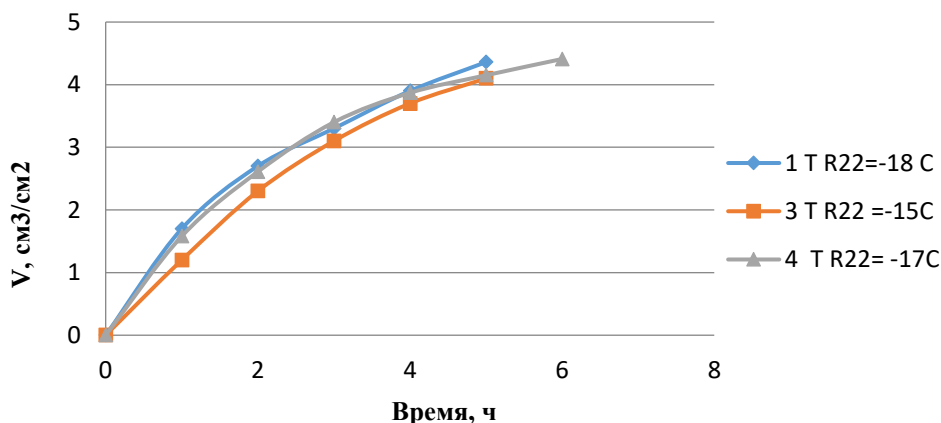


Рис.3 – кинетика формирования блока льда при разных температурах фреона

Существенное влияние на кинетику процесса оказывает начальная концентрация сока. В зависимости от начальной концентрации степень концентрирования изменялась от 1,3 (при высокой начальной концентрации) до 3,5 (при низкой). Изменения концентрации сока при разных начальных концентрациях сока представлены на рис.4.

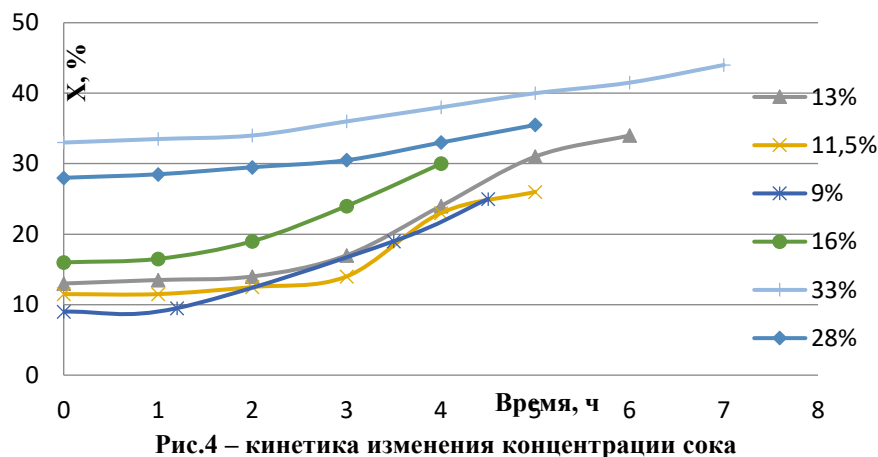


Рис.4 – кинетика изменения концентрации сока

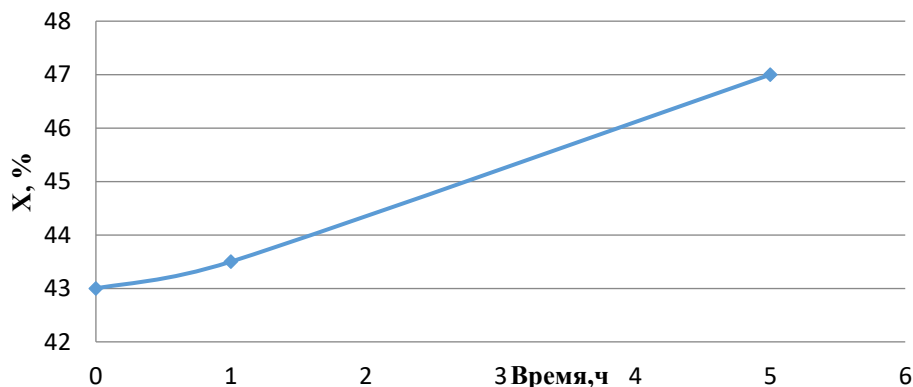


Рис.5 – кинетика вымораживания высококонцентрированного сока

Важным этапом является процесс сепарирования, который определяет потери сухих веществ со льдом, поэтому проводится исследование изменения концентрации стоков с блока льда.

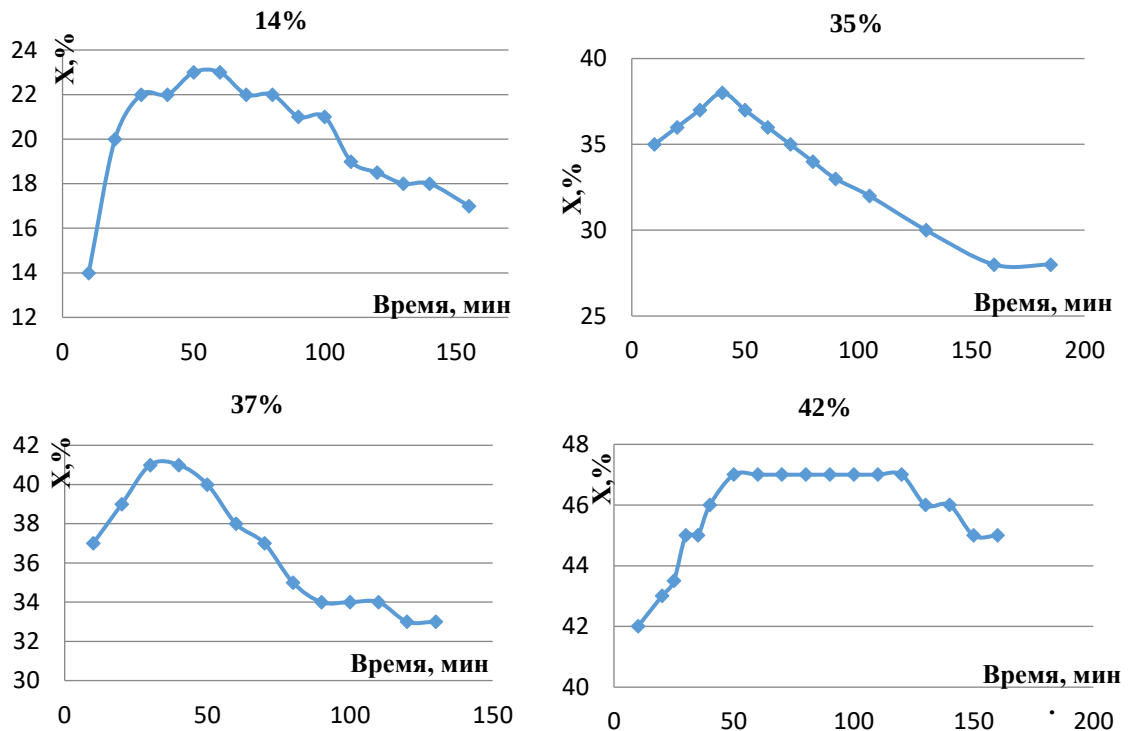


Рис. 6 – кинетика сепарирования гранатового сока при разных начальных концентрациях

При низких концентрациях сока концентрация стоков растет на $\approx 10\%$, при высоких – на $\approx 10\%$.

Анализ результатов исследования

1. Очевидное достоинство технологий – высокое качество продукта.
2. Широкое внедрение концентрирования вымораживанием сдерживается относительно высокими капитальными затратами и производственными расходами по сравнению с методом выпаривания.
3. Усилия ученых разных стран направлены на совершенствование технологии. Тенденции поисков – снижение потерь массы продукта за счет управления процессом кристаллизации и совершенствования принципов и средств разделения маточного раствора и льда.
4. Известные средства сепарирования не обладают должной эффективностью. Процесс сепарирования наиболее трудоемкий и малопроизводительный в технологии криоконцентрирования.
5. Технологии выпаривания практически исчерпали свой резерв энергетической эффективности, в то время как при криоконцентрировании этот параметр до настоящего времени продолжает сохранять довольно значительную величину.

Выводы

Экономическая эффективность определяется рядом аспектов.

Энергетический - затраты энергии на превращение воды в ледяную фазу в 7 раз меньше, чем в пар. (энергия, необходима для превращения 1 кг воды в лед составляет 0,33 МДж, а при превращении воды в пар – 2,6 МДж)

Логистический - высококачественный концентрированный сок занимает меньшие объемы, требуют меньших затрат энергии при хранении и топлива при транспортировке.

Технологический - концентрированный сок сохраняет все питательные свойства сырья.

Литература

1. Э.С. Гореньков, А.Н. Горенькова, Г.Г. Усачева. Технология консервирования – М.: Агропромиздат. – 1987. – 351 с.
2. Health and beauty. Гранатовый сок. [Интернет-ресурс. Доступ по ссылке: http://hnb.com.ua/articles/s-zdorovie-granatovyy_sok-2754]
3. ГОСТ 18192-72 (Соки плодовые и ягодные концентрированные.)
4. Самсонова А.Н., Ушева В.Б. Фруктовые и овощные соки – М. Агропромиздат. – 1990. – 287с.

УДК 338.45: 662.6

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ С УТИЛИТНЫМИ ПУТЯМИ

Ульев Л.М., д.т.н., профессор, Маатук А., аспирант
Национальный технический университет «ХПИ»

RECONSTRUCTION OF HEAT EXCHANGE SYSTEMS WITH UTILITY WAYS

Ul'ev L.M., doctor of technical sciences, professor, Maatuk A., graduate student

National Technical University "KhPI"

Аннотация. В работе приведен широкий анализ опубликованных работ, посвященных методам интеграции процессов и оптимизации теплообменных систем в производствах, использующих химико-технологические методы переработки и производства веществ. Из множества возможных систем выделена двухпоточковая задача с утилитными путями, и для нее рассмотрены процессы перераспределения тепловых нагрузок на существующих теплообменных аппаратах и температур теплоносителей на входе и выходе из них при выполнении проектов энергоэффективной реконструкции систем теплообмена в условиях технологических и экономических ограничений. Получены аналитические зависимости изменения тепловых нагрузок, существующих теплообменных аппаратов и температур теплоносителей от величины площади поверхности теплообмена новых теплообменных размещений. Определено оптимальное значение площади поверхности теплообмена, добавляемой при реконструкции, при котором наблюдается наименьшая приведенная стоимость проекта реконструкции.

Abstract. The paper presents a wide analysis of published works devoted to the methods of process integration and optimization heat-exchange systems in production using chemical-technological methods for processing and production of substances. The dual stream heat system with utility paths was selected from the many possible exchanger systems and the processes of the redistribution of heat loads on existing heat exchangers and temperatures of heat carriers at the input and the output of them were studied for it with fulfilling of the energy efficient retrofit project in terms of technological and economic constraints. The analytical dependences for change of thermal loads for existing heat exchangers and heat carriers temperatures were obtained from the magnitude of the surface area for heat transfer a new heat-exchange placements. The definition of change of technological parameters for existing heat exchangers can significantly reduce economic costs for the implementation of energy efficiency retrofit of the heat exchanger networks for operating companies using the methods of heat and process integration, in particular using the methods of pinch analysis. For case study, two streams problem for heat transfer in heat network at the crude and gas separation units is considered in the paper. The exist system have three heat exchangers. The temperature measurements were fulfilled for all heat exchangers and the heat loads for heat exchangers and utility were calculated. The installation of one heat exchanger at the cool side of the system is proposed in retrofit project. The dependence of the temperature change of the hot and cold process stream of the value of the additional surface obtained for each heat exchanger. Utility power and power recovery of thermal energy in the system is also analyzed. The dependence for annual cost of capital investments in the retrofit project of heat network of the installed heat exchanger surface taking into account the finite surface area of separate sections of heat transfer is presented in the paper. It is shown that the total discounted cost of the retrofit project will be a non-monotonic function of new heat exchange surfaces. The optimal value of heat transfer surface at which the total discounted cost of the reconstruction project will be minimal is obtained in the paper.

Key words: energy efficiency, retrofit, heat exchanger network, pinch analysis.

Ключевые слова: энергоэффективность, реконструкция, сеть теплообменников, пинч анализ..

Введение. Интеграция Украины в мировую экономику и европейский выбор народа Украины, который приобрел поддержку индустриально развитых стран, предполагает достижения уровня жизни и энергоэффективности экономики стран Европейского Содружества. В настоящее время энергетическая ситуация в Украине критическая, прежде всего вследствие того, что за счет собственной добычи ископаемого органического топлива Украина сегодня может только частично удовлетворить потребности: в нефти – на 10–12 %, в природном газе – на 20–25 %, в угле – на 85–90 %. Пути и методы использования возможностей энергосбережения и снижения техногенной нагрузки известны уже четыре десятилетия, и получили широкое распространение в индустриально развитых странах. Прежде всего, это методы

інтеграції процесів и, в частности, методы пинч анализа [1], берущие свое начало в тепловой интеграции теплообменных сетей.

Анализ литературных источников. Одной из первых работ в области интеграции процессов была диссертационная работа Е.С. Хохманна из Университета Южной Каролины, США [2], в которой дано термодинамическое определение минимальной величины энергопотребления в теплообменной системе. Дальнейшее развитие тепловая интеграция получила в работах Линнхоффа и Фловера [3], Фловера и Линнхоффа [4]. Классическая формулировка тепловой интеграции была сделана в книге Б. Линнхоффа и др. [5]. К публикации работы [5] были созданы методы Пинч проектирования для синтеза энергоэффективных систем оптимизированных процессов. Одновременно развивались методы линейного и не линейного программирования синтеза оптимальных энергоэффективных систем теплообменников. Большинство опубликованных работ было посвящено, так называемым корневым проектам, т.е. синтезу новых энергоэффективных систем теплообмена для оптимизированных процессов. В последнее время больше внимания уделяется тепловой интеграции в системах теплообмена работающих предприятий. Методы линейного и нелинейного программирования для синтеза энергоэффективных систем теплообмена рассматривались в работах [6]. В работе [7] предложили путевой метод (Path method) реконструкции теплообменных сетей, который можно отнести к методам декомпозиции. Жу и др. [8] развили методы Пинч анализа с использованием смешанного целочисленного линейного программирования. Но для успешной реализации смешанных методов линейного и нелинейного программирования необходимо использование современных суперкомпьютеров [9]. В [9] был представлен гибридный генетический алгоритм для получения оптимальных теплообменных систем с полным использованием существующих теплообменников и их структур. В недавно опубликованных работах [10, 11] обнародован метод мостового анализа (Bridge analysis), который основан на диаграммах переноса энергии и изменениях в теплопередаче тепловой сети, необходимых для уменьшения энергозатрат, которые и названы «мостами».

Актуальность. Технические, технологические и экономические ограничения могут быть лишь частично учтены в методах программирования, а в метода пинч анализа могут также использоваться как эвристики. Как правило, в промышленности при проведении реконструкции систем теплообмена требуют использовать минимально возможное число новых аппаратов, даже за счет снижения экономической выгоды, но, если и удастся сделать проект энергоэффективной реконструкции только за счет переобвязки существующих теплообменников, при его реализации, в системе теплообмена произойдет перераспределение температур на аппаратах и их тепловых нагрузок. Из-за этого возникнет необходимость проведения экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) для теплообменников системы, поскольку теплообменные аппараты – это оборудование, работающее под давлением. В итоге, казалось бы, безинвестиционное мероприятие переобвязки теплообменников превращается в мероприятие с большими затратами и сроком окупаемости, поскольку стоимость проведения ЭПБ одного теплообменника равна 4–5 тыс. долл. США. Поэтому при выполнении проектов энергоэффективной реконструкции необходимо контролировать технологические параметры существующих и новых аппаратов. В работе [12] на основе метода путевого анализа создан метод структурного целеуказания, позволяющий идентифицировать подсистемы теплообменной сети, содержащие, по крайней мере, одну горячую и одну холодную утилиту, и имеющие большой энергосберегающий потенциал.

Постановка задачи. В настоящей работе рассматривается повышение эффективности и оптимизация двухпоточковых теплообменных систем, которые были выделены из теплообменных сетей в процессах нефте- и газопереработки [12, 13] с помощью методов, описанных в [1] и [7].

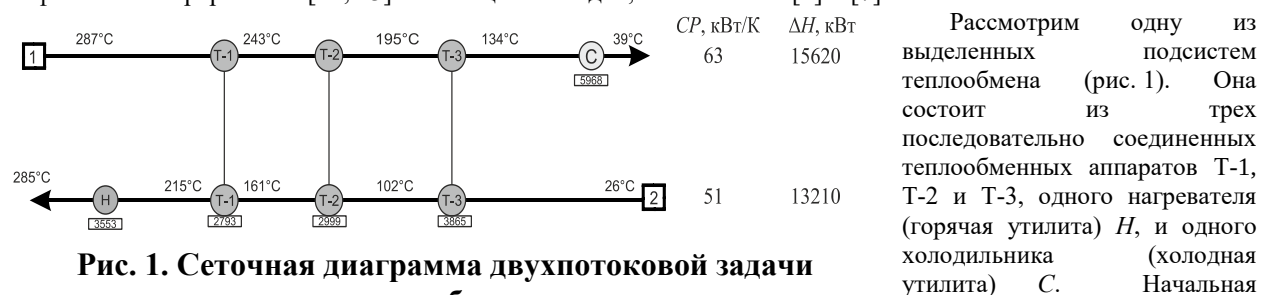


Рис. 1. Сеточная диаграмма двухпоточковой задачи

температура горячего технологического потока равна $t_{hS} = 287^\circ\text{C}$, конечная, равна $t_{hT} = 39^\circ\text{C}$. Начальная температура холодного технологического потока равна $t_{cS} = 26^\circ\text{C}$, конечная, равна $t_{cT} = 285^\circ\text{C}$. Мощность горячей утилиты составляет значение $Q_{H\min} = 3617$ кВт, холодной утилиты равна $Q_{C\min} = 6032$ кВт, мощность рекуперации тепловой энергии – $Q_{\text{REC}} = 9592$ кВт. Поточковая теплоемкость горячего технологического потока равна $CP_h = 63$ кВт/град, холодного $CP_c = 51$ кВт/град. При выполнении проекта реконструкции системы теплообмена будем считать теплофизические свойства теплоносителей постоянными, их расходы и параметры теплообменных аппаратов фиксированными, а их характеристики приведены в таблице 1. Также будем считать, что тепловые потери в системе теплообмена отсутствуют.

Таблица 1 - Характеристики теплообменных аппаратов

Теплообменник	Горячий теплоноситель		Холодный теплоноситель			Поверхность теплообмена, м²	Коэффициент теплопередачи, кВт/м²град	
	Температура, °С		Потоковая тепл., кВт/град	Температура, °С				
	Вход	Выход		Вход	Выход			
T-1	287	243	63	161	215	51	214	0.17
T-2	243	195	63	102	1161	51	214	0.16
T-3	195	134	63	26	102	51	214	0.18

Результаты решения и обсуждение Построим температурно-энтальпийную диаграмму исходной системы теплообмена. Для этого отложим температурные профили теплоносителей так, чтобы их перекрытие по энтальпийной оси составляло значение мощности рекуперации тепловой энергии в системе теплообмена (рис. 2). Температурно-энтальпийная диаграмма системы теплообмена показывает возможность уменьшения величины горячих и холодных утилит, поскольку нагрузка на охлаждение горячего потока равна $\Delta N_h = CP_h \times (t_{hs} - t_{ht}) = 15620$ кВт, а нагрева холодного теплоносителя $\Delta N_c = CP_c \times (t_{cs} - t_{ct}) = 13210$ кВт, что больше мощности рекуперации. В рассматриваемом случае для снижения значения утилит необходимо увеличить мощность рекуперации тепловой энергии в системе, а для этого необходимо увеличить площадь поверхности теплообмена, поскольку параметры существующих теплообменников фиксированы.

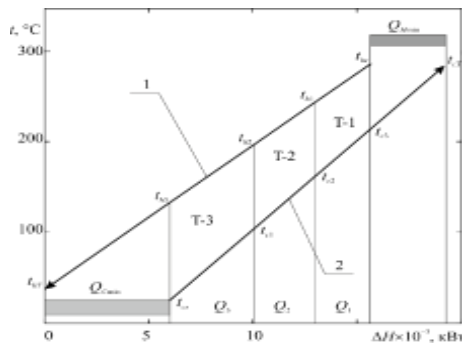


Рис. 2. Температурно-энтальпийные профили теплоносителей двухпоточковой системы теплообмена.

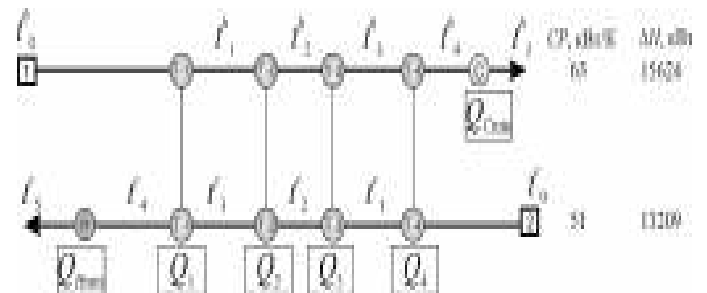


Рис. 3. Сеточная диаграмма двухпоточковой системы теплообмена с четырьмя теплообменниками.

Паспортные данные насосного оборудования и существующие перепады давления по теплоносителям позволяют установить дополнительное теплообменное оборудование в рассматриваемой системе теплообмена, а анализ расположения оборудования на установке показал, что установить дополнительный теплообменник возможно только на холодном крае теплообменной системы (Рис. 3). Рассмотрим, как будут меняться температуры на теплообменных аппаратах в зависимости от тепловой нагрузки нового теплообменника T-4. Для этого запишем тепловые балансы для каждого теплообменника, предполагая, что в системе N аппаратов:

$$CP_c(t_{N-i}^c - t_{N-i-1}^c) = CP_h(t_i^h - t_{i+1}^h), \quad i = 0 \dots N-1, \quad (1)$$

где t_0^h - начальная температура горячего потока, в нашем случае, равная 287 °С, t_0^c - начальная температура холодного потока, в нашем случае, равная 26 °С.

С другой стороны, нагрузка на теплообменный аппарат определяется, как:

$$Q_i = S_i \Delta T_{\ln} / K_i, \quad i = 0 \dots N-1, \quad (2)$$

и тогда для i-го теплообменника можно записать:

$$S_i K_i \frac{(t_i^h - t_{i+1}^h) - (t_{N-1}^c - t_{N-i-1}^c)}{\ln \frac{t_i^h - t_{N-1}^c}{t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c}} = CP_h(t_i^h - t_{i+1}^h), \quad i = 0 \dots N-1. \quad (3)$$

Принимая во внимание (1) получим соотношение:

$$t_i^h - t_{N-1}^c = (t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c) e^{A_i}, \quad i = 0 \dots N-1, \quad (4)$$

где $A_i = \frac{S_i K_i}{CP_h} \left(1 - \frac{CP_h}{CP_c} \right)$.

Учитывая, что N=4, т.е. в теплообменной системе 4 теплообменника, делая в системе уравнений (4) последовательные подстановки, находим температуру холодного потока на выходе из первого теплообменника:

$$t_4^c = t_0^h - (t_4^h - t_0^c) E, \quad (5)$$

где $E = e^{A_1} e^{A_2} e^{A_3} e^{A_4}$.

Используя выражение для теплового баланса всей системы теплообмена

$$(t_4^c - t_0^c)CP_c = (t_0^h - t_4^h)CP_h, \quad (6)$$

найдем температуру горячего потока на выходе из 4-го теплообменника:

$$t_4^h = \frac{t_0^h \left(1 - \frac{CP_h}{CP_c}\right) + t_0^c (E-1)}{E - \frac{CP_h}{CP_c}}. \quad (7)$$

Определим разность температур теплоносителей на холодной стороне теплообменной системы:

$$\Delta t_m = t_4^h - t_0^c = (t_0^h - t_0^c) \frac{CP_c - CP_h}{E CP_c - CP_h}, \quad (8)$$

Из системы уравнений (1) найдем температуры теплоносителей на входе в теплообменники и температуры теплоносителей на выходе из теплообменников:

$$t_1^c = b + d \Delta t_m e^{A_4}, \quad (9)$$

$$t_2^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (10)$$

$$t_3^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (11)$$

$$t_4^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2} e^{A_1}, \quad (12)$$

$$t_1^h = b + g \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (13)$$

$$t_2^h = b + g \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (14)$$

$$t_3^h = b + g \Delta t_m e^{A_4}, \quad (15)$$

где $b = \frac{CP_c - CP_h}{CP_c - CP_h}$, $d = \frac{CP_h}{CP_c - CP_h}$, $g = \frac{CP_c}{CP_c - CP_h}$.

Теперь мы можем записать выражения для вычисления мощности горячих и холодных утилит:

$$Q_{Cmin} = CP_h (t_4^h - t_5^h), \quad (16)$$

$$Q_{Hmin} = CP_c (t_5^c - t_4^c). \quad (17)$$

Используя найденные температуры теплоносителей на входе и выходе теплообменников, вычисляем их тепловые нагрузки (рис. 3):

$$Q_i = CP_c (t_{N+1-i}^c - t_{N-i}^c) = CP_h (t_{i-1}^h - t_i^h). \quad (18)$$

В рассматриваемом случае, по технологическим причинам могут быть использованы для реконструкции только кожухотрубчатые теплообменные аппараты. Стоимость установки одной секции кожухотрубчатого теплообменника определится, как [3]:

$$CosT = A + B(S)^c, \quad (19)$$

где A – стоимость установки одной секции теплообменника, B – эквивалент стоимости 1 м² площади теплообменной поверхности, c – показатель нелинейной зависимости стоимости, отображающей возможность размещения поверхности теплообмена различной величины в одном кожухе. В данном случае значения этих параметров равны: $A = 40000$ долл. США; $B = 1000$ долл. США; $c = 0.97$.

Максимальная площадь поверхности теплообмена для одной секции у выбранного производителя составляет значение $S_{max} = 250$ м².

С учетом величины максимальной поверхности теплообмена одной секции, выражение (18) для одного теплообменного размещения, примет вид:

$$CosT_m = A \left\lceil \frac{S}{S_m} \right\rceil + B(S)^c, \quad (20)$$

где $\lceil x \rceil$ функция «потолка» Айверсона, возвращающая наименьшее целое, большее или равное x [15].

Стоимость горячих утилит на рассматриваемой установке включает стоимость собственного газа, природного газа из городской магистрали, стоимость жидкого топлива, состоящего из смеси мазута, газойлей и дизельных топлив. Итоговая стоимость горячей утилиты составляет значение, равное $C_H = 120$ долл. США за 1 кВт год. Стоимость холодных утилит, включает стоимость свежей охлаждающей воды, стоимость электроэнергии, питающей приводы насосов и двигателей вентиляторов воздушных холодильников, и она равна $C_C = 25$ долл. США в год.

Приведенная стоимость установленного оборудования определяется выражением [4]:

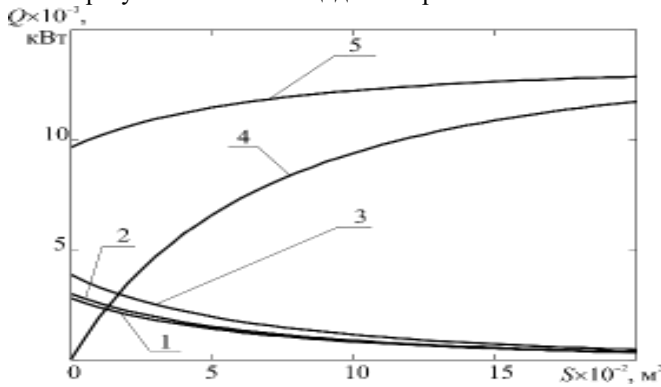
$$C_d = CosT_m \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1}, \quad (21)$$

где i – годовая процентная ставка, n – число лет.

Приведенная стоимость энергии в рассматриваемой системе теплообмена определится соотношением:

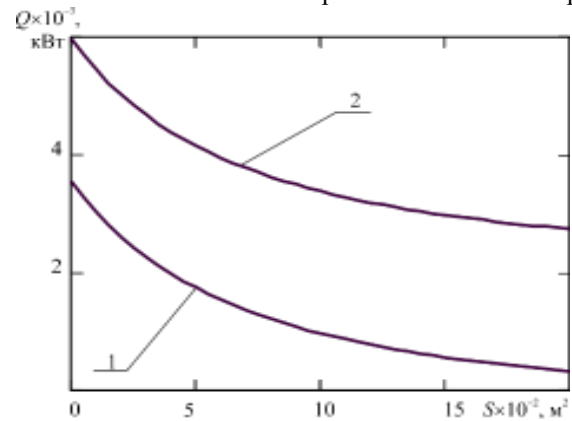
$$CE = Q_{Hmin} C_H + Q_{Cmin} C_C. \quad (22)$$

При увеличении площади поверхности теплообмена нового теплообменного аппарата его тепловая нагрузка



1 – на первом теплообменном аппарате; 2- на втором теплообменнике; 3- на третьем; 4 – на четвертом; 5- общая мощность рекуперации теплоты в новой теплообменной системе.

Рис. 4. Мощность рекуперации тепловой энергии.

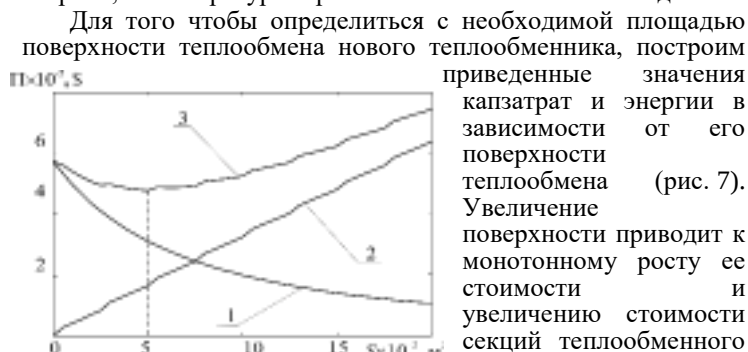


1 – холодных; 2- горячих.

Рис. 5. Мощность утилит, потребляемых процессом.

будет возрастать (рис. 4), а тепловая нагрузка существующих теплообменников будет уменьшаться, хотя общая мощность рекуперации теплоты будет лишь увеличиваться. Вследствие этого мощность горячих и холодных утилит уменьшается с увеличением поверхности теплообмена четвертого аппарата (рис. 5). Уменьшение тепловой нагрузки существующих аппаратов происходит в основном за счет увеличения теплообменной поверхности четвертого аппарата. С уменьшением нагрузки на существующих аппаратах происходит уменьшение разности температур теплоносителей на них, и уменьшение изменения температуры теплоносителей в аппаратах (рис. 6).

Наибольшая разность температур между теплоносителями, начиная с некоторой величины его поверхности, будет наблюдаться на новом теплообменнике. Как следствие все температуры теплоносителей на горячей стороне нового теплообменника будут стремиться к своим граничным значениям на горячей стороне, а температура горячего теплоносителя на холодной стороне нового аппарата к целевому значению.



1 – годовая стоимость энергии; 2- приведенные капитальные затраты; 3- общая приведенная стоимость проекта реконструкции.

Рис. 7. Дисконтированные стоимостные кривые

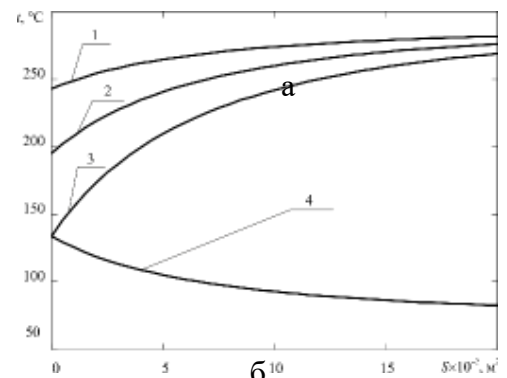
стоимость проекта реконструкции будет немонотонной функцией. Минимальное значение будет соответствовать минимальным приведенным затратам на проект реконструкции теплообменной системы, а величина новой площади поверхности теплообмена будет являться оптимальной для проекта реконструкции. В нашем случае оптимальной величиной является поверхность теплообмена площадью 500 м².

Выводы

В работе решена задача оптимизации проектов реконструкции двухпотоковых теплообменных систем, позволяющая оценивать режимные параметры работы теплообменников после реконструкции.

Литература

1. Smith R. Chemical Process Design and Integration. 2nd Edition. – Chichester: Wiley & Sons Ltd, – 2016. – 920 p.
2. Hohmann E.C. Optimum networks for heat exchange. PhD thesis. Los Angeles. Univ. of Southern Calif. 1971.



а) - изменение температуры холодного теплоносителя. 1- температура входа в 4й теплообменник, 2- в 3й, 3- во 2й, 4 в 1й; б) - горячего теплоносителя в зависимости от величины площади поверхности теплообмена нового теплообменника. 1- температура выхода из 1го теплообменника, 2- из 2го, 3- из 3го, 4 из 4го.

Рис. 6. Изменение температуры

3. Linnhoff B, Flower JR: Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks// AIChE J. 1978. Vol. 24, pp. 633-642.
4. Flower J.R., Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks — 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality// AIChE J. 1978. Vol. 24, pp. 642-654.
5. Linnhoff B., Townsend D.W., et al. A user guide on process integration for the efficient use of energy. IChemE, Rugby, UK 1982 (New editions 1991, 1994, 2007). – 247 p.
6. Mizutani F.T., Pessoa F.L.P., Queiroz E.M., Hauan S., Grossmann I.E. Mathematical programming model for heat exchanger networks synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Networks synthesis // Ind. Eng. Chem. Res. 2003, vol. 42, pp. 4019-4027.
7. Reisen van J.L.B., Grievink J., Polley G.T., Verheijen P.J.T. The placement of 2-stream and multi-stream heat-exchangers in an existing network through path-analysis // Comput. Chem. Eng. 1995, vol. 19, pp. 143-148.
8. Zhu X.X., Zangir M., Klemes J. Heat transfer enhancement for heat exchanger network retrofit // Heat Transf. Eng. 2000, vol. 21, pp. 7-18.
9. Liu X.-W., Luo X., Ma H. Studies on the retrofit of heat exchanger network based on the hybrid genetic algorithm // Appl. Therm. Eng. 2013, vol. 61, No. 2, pp. 785-790.
10. Bonhivers J.-C., Srinivasan B., Stuart P.R. New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 1 – Concepts // Appl. Ther. Eng. – 2017, vol. 119, No. 5, pp. 659–669.
11. Bonhivers J.-C., Alva-Argaez A., Srinivasan B., Stuart P.R. New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 2 – Stepwise and graphical approach // Applied Thermal Engineering. – 2017, vol. 119, No. 5, pp. 670–686.
12. Khusanov A.E., Ulyev L.M., Vasilyev M. V., Kaldybaeva B.M., Maatouk A. Heat Energy Integration of Light Hydrocarbons Separation Process // International Conference of Industrial Technology and Engineering. Shymkent, Kazakhstan, – 2015, – P. 149–155.
13. Ulyev L., Vasilyev M., Maatouk A., Duic N., Khusanov A. Total Site Integration of Light Hydrocarbons Separation Process // Chemical Engineering Transaction. – 2016. – Vol. 52. P. 1–6.
14. Graham R.L., Knuth D.E., Patashik O. Concrete Mathematics. A Foundation for Computer Science. Second Edition. - Amsterdam: Addison-Wesley. 1994.

УДК 628.81:378.16:621.577

ПРОЕКТ ТЕРМОМОДЕРНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО КОРПУСА ОНАПТ

Перетяка С.Н. канд. техн. наук, доцент, Козинец А.Ю. студент,

Бандура Д.А. студент

Одесская национальная академия пищевых технологий

PROJECT OF THERMOMODERNIZATION OF THE EDUCATIONAL CASE OF ONAFT

PERETYAKA S.N. cand. tech. sci., associate professor,

KOZINETS A.Yu. student, BANDURA D.A. student

Odessa national academy of food technologies

Аннотация: В статье рассмотрен проект термомодернизации учебного корпуса, который обеспечит допустимые условия работы в учебном корпусе Одесской национальной академии пищевых технологий. Проведен анализ существующих систем отопления в развитых странах. Предложены мероприятия технического и организационного характера, которые позволяют обеспечить нормативные условия в учебных аудиториях при полном отказе от центрального отопления. Проанализирована возможность внедрения системы энергетического менеджмента.

Abstract: The article considers the project of thermomodernization of the educational building, which will ensure the admissible working conditions in the educational building of the Odessa National Academy of Food Technologies. The analysis of the existing heating systems in developed countries is carried out. The proposed technical and organizational arrangements that allow to ensure the normative conditions in classrooms with complete refusal of central heating. The possibility of introducing an energy management system is analyzed. .

Ключевые слова: отопление, термомодернизация, центры учета энергии, система энергетического менеджмента

Keywords: heating, thermomodernization, energy accounting centers, energy management system

Планета Земля стремительно приближается к изменению климата. Такие климатические изменения периодически случались в истории нашей планеты, однако, впервые это вызвано деятельностью человека, и скорость текущих изменений беспрецедентна. CO₂, выделяемого при сгорании ископаемого топлива и кислорода, изменяет состав нашей атмосферы. Кроме всего прочего, неконтролируемое использование

традиционных видов энергии ведет к стремительному истощению мировых запасов ископаемых энергоносителей. Наименьшая величина сокращения энергопотребления, особенно в густонаселенных местах, ведет к снижению объема выбросов загрязняющих веществ и, следовательно, помогает защитить окружающую среду. Единственная область, где можно резко снизить объемы потребляемого топлива и, как следствие, расход энергии и объемы выбросов - это существующие и новые здания, для этого необходимо улучшить теплоизоляцию и установить более эффективные отопительные системы. Для снижения выбросов CO_2 и защиты окружающей среды в будущем нам придется обходиться гораздо меньшим количеством энергии для отопления, чем мы использовали до сих пор. В то время, как существующие не усовершенствованы здания старой постройки тратят на отопление от 300 до 400 кВт·ч/м² в год энергии, потребность в отопительной энергии для зданий будущего поколения составляет от 20 до 40 кВт·ч/м² в год. Так что основная характеристика архитектуры зданий будущего - это ультранизкое, а также нулевое потребление энергии. Таким образом, можно выделить основные направления развития энергоэффективных зданий:

1. Снижение потребления тепловых ресурсов при полном или частичном удовлетворении электроэнергией.
2. Создание более совершенных систем вентиляции и теплоизоляции.
4. Уменьшение потребления воды.

Современные новации в области строительства направлены на то, чтобы человеческие поселения приносили как можно меньше вреда окружающей среде. Примером домов, которые в будущем позволят нам жить в гармонии с природой, в то же время, не лишая себя привычного комфорта, являются так называемые здания «нулевой энергии» (zeroenergy house) или «пассивные» дома (passive house), объединенные общим термином «энергоэффективные дома».

Катастрофическая ситуация с существующей системой централизованного теплоснабжения в Украине известна [1-3]. Рассмотрим, как эту проблему с отоплением решают в развитых странах.

В Великобритании каждый житель обогревается «в одиночку». Такого понятия, как центральное отопление, в стране нет. В домах и квартирах установлены бойлеры - индивидуальные газовые колонки, нагревающие воду и батареи. В зависимости от аппетитов и возможностей хозяина можно либо замерзнуть, экономя на обогреве, или топить усиленно, нагревая свои батареи до максимума. В туалетах и ванных батареях, как правило, нет - зимой температура в них не выше 10 градусов; в спальне тоже нет обогрева. Всю ночь топить - дорого. Отопление - несколько часов в сутки, очень экономно. Британские физиологи составили таблицу-инструкцию: выше 21 градуса - температура дискомфорта, выше 24 - температура, повышает риск сердечных приступов. Нижний порог комфорта - 18 градусов. От 16 до 18 - температура нормальная, риски невысокие, и такая температура держится в пяти миллионах домов Королевства. Компании, поставляющие электричество и газ (это конкурентный рынок, и можно выбрать, у кого покупать тепло), дают список советов, как не замерзнуть зимой. Например, не рекомендуется запускать стиральную машину «вхолостую» - надо ждать, пока бак заполнится грязным бельем под завязку. Советуют стирать в холодной воде, это полезнее для белья, чем горячая вода. Выключать компьютер, когда он простаивает без работы. Не оставлять на зарядке мобильник на всю ночь. Использовать энергосберегающие лампочки. Принимать короткий душ вместо длительной ванны.

В Японии ситуация с отоплением следующая: система центрального отопления есть только в префектуре Хоккайдо - холодной части страны. Остальное население Японии обогревает себя самостоятельно. Большинство современных домов в Японии обогревается с помощью электрических кондиционеров (зима / лето) и обогревателей различных типов: электрических, масляных, керосиновых или газовых. В холодное время года японцы надевают пижамы или используют поверх обычной одежды электрическое. Очень популярны в Японии электрические ковры. Такой ковер напоминает электрическое одеяло. Пользователь может регулировать температуру обогрева. Можно обогревать только часть ковра, там, где, например, вы сидите. Кстати, в японских школах отопления нет. В рекреационных зонах есть точки локального обогрева, где в перерывах дети могут погреть руки.

В Германии также нет центрального отопления в нашем классическом понимании. Здесь каждый обогревается сам. В частных домах - свои котельные, в многоквартирных домах - отдельное газовое оборудование, которое греет воду для батарей. Сколько газа сжег, столько и заплатил. На всех батареях стоят вентили с термостатами, ими регулируют температуру в помещении. В гостиной, где семья проводит много времени, их включают сильнее, а в туалете - на самый минимум. Существуют даже специальные рекомендации для температурного режима помещений. Для зала достаточно 20 градусов тепла, для ванной до 22 градусов, в спальнях комнатах необходимо 16-18 градусов тепла. В мало используемых помещениях (туалетах, кладовых и др.) температура воздуха должна быть 14-16 градусов тепла. Если позволяют обстоятельства (отсутствие маленьких детей), то поддерживают температуру еще ниже. Ночью немцы часто пользуются электрическими простынями - грелкой на все тело. Она включается и выключается автоматически. Немецкие домовладельцы все охотнее используют для обогрева индивидуальных домов биомассу, дрова, пеллеты из отходов деревообработки, тепловые насосы и солнечные батареи. Государство поддерживает эту тенденцию законодательно и материально. В Германии вступил в силу закон, согласно

которому новые здания сдаются в эксплуатацию, обязаны часть потребляемой ими энергии черпать из возобновляемых источников. Благодаря различным государственным программам домовладельцам, которые перешли на экологические виды топлива, компенсируют до 15 процентов расходов на приобретение и установку новой техники.

Центрального отопления в нашем понимании во Франции нет. Вместо этого есть два варианта:

1. Общедомовое отопление - это централизованное отопление в отдельно взятом многоквартирном доме.

2. Индивидуальное отопление. В ванной, туалете или кухне находится аппарат, регулирующий горячую воду. Он электрический или газовый. К этому аппарату подключены и батареи. Тепло в квартире регулируется. Электрические нагреватели распространены больше, чем газовые. Их главное преимущество: они не требуют регулярного и дорогой проверки и обслуживания, как газовые. Использование входит в общий счет за электричество. Тариф на электричество в стране - двойной полный - с 7.00 до 23.00 и льготный, то есть в полтора раза меньше, - с 23.00 до 7.00. Государство уже несколько десятилетий подталкивает граждан экономить энергию. И не только с помощью тарифной политики. Мощный рычаг - фискальный. Все французы, осуществляющие работы по теплоизоляции своего жилья - старого или только что отстроенного, - имеют право по закону вписать затраченные средства в налоговую декларацию. В этом случае от 25 до 50 процентов от стоимости работ им зачтут со знаком «минус» и могут снизить подоходный налог. То же самое касается установки различного рода энергоэффективного экологически выгодного оборудования - солнечные батареи, нагреватели с повышенной энергоотдачей, как газовые, так и электрические. На их приобретение граждане получают льготные кредиты. Что касается нового жилья, то начиная с 2008 года каждый проект площадью более 1000 квадратных метров должен отвечать новым требованиям теплоизоляции. Иначе его не принимают и отправляют на доработку.

В условиях Финляндии на глубине 200 метров температура может достигать до +10 градусов, поэтому все чаще новый финский дом черпает геотермальную энергию. В домах устанавливают специальное устройство: тепловой насос. Стоит он, конечно, недешево, зато окупается за 5-7 лет и позволяет экономить от 30 и выше процентов электроэнергии. Неудивительно, что такие цифры соблазняют и владельцев старых домов переоборудовать свои жилища. Финны используют кондиционеры для обогрева домов. При морозах до - 5 °C это работает прекрасно: потратив на работу 1 кВт электроэнергии, тепловой насос произведет до 2 и даже 5 кВт тепла. Такой кондиционер прекрасно зарекомендовал себя для небольших домов - не более 120 м², т.к. отпадает необходимость бурить землю и устанавливать дорогостоящее оборудование: все расходы не более 2000-3000 евро.

Цель данных исследований обосновать проект термомодернизации для учебного корпуса «В» Одесской национальной академии пищевых технологий, который обеспечит соответствующие условия пребывания сотрудников и студентов с минимальными финансовыми затратами. Это предполагает полный отказ от центрального отопления, возможность использования корпуса в зимний период и минимизацию затрат на создание допустимых микроклиматических условий в корпусе.

Таким образом, термомодернизация должна обеспечить следующие нормы температуры и относительной влажности воздуха в помещениях учебного заведения [4, 5]:

- ✓ в классах, учебных кабинетах, лабораториях, актовых залах, аудиториях - 18-20 °C;
- ✓ в спортивных залах - 15-17 °C;
- ✓ в помещениях для проведения кружковой работы - 19-23 °C;
- ✓ в раздевалках при спортивных залах - 19-23 °C;
- ✓ в библиотеках, кабинетах администрации - 17-21 °C;
- ✓ в туалетах - 17-21 °C;
- ✓ в вестибюле, гардеробе - 16-19 °C.
- ✓ относительная влажность воздуха должна быть 40 – 60 %.

Характеристика объекта исследований:

- Площадь корпуса – 10700 м²
- Объем помещений – 19600 м³
- Вентиляция – естественная неорганизованная
- Материал стен – кирпич ($\lambda = 0,55 \text{ Вт/(м·К)}$)
- Толщина стен – $\delta = 0,69 \text{ м}$.
- Термическое сопротивление ограждений – $R = 1,25 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$
- Коэффициент остекления - 0,128 – 0,673.
- Стоимость отопления 1 200 000 грн в год

В результате проведенных исследований установлено, что для термомодернизации учебного корпуса необходимо следующие:

Технические мероприятия:

- 1) Термоизоляция стен (толщина изоляции 250 мм) (КВ₁) – 639920 грн.
- 2) Замена «старых» окон (227 шт.) на энергоэффективные (КВ₂) – 2376773 грн.

- 3) Установка грунтового теплообмінника (KB₃) – 104425 грн.
- 4) Установка рекуператора теплоты вентиляционных выбросов (2 шт.) (KB₄) – 717884 грн.
- 5) Установка калорифера (KB₅) – 648750 грн.
- 6) Монтаж приточно-вытяжной вентиляции (KB₆) – 900000 грн.

Организационные мероприятия:

- 7) Аудит каждой аудитории (график работы) – необходимость отопления
- 8) Отказ от отопления коридоров, лестниц и 3-х лекционных аудиторий (2400 м²)
- 9) Отказ от вентиляции коридоров, лестниц и 3-х лекционных аудиторий (7450 м³)
- 10) Внедрение системы энергетического менеджмента.
 - ✓ Создание центра учета энергии.
 - ✓ Назначение ответственного, который отвечает за потребление ресурсов корпусом.
 - ✓ Установка счетчиков (отопление, электрическая энергия, вода).
 - ✓ Регулярное снятие показаний (отопление, электрическая энергия, вода).
 - ✓ Расчет плановых показателей.

В итоге полный отказ от центральной системы отопления.

Суммарные капитальные вложения:

$$KB = KB_1 + KB_2 + KB_3 + KB_4 + KB_5 + KB_6 = 639920 + 2376773 + 104425 + 717884 + 22884 + 900000 = 4853423 \text{ грн}$$

Стоимость отопления до модернизации:

$$C_1 = N_1 \cdot \tau_1 \cdot Z_T = 190 \cdot 4320 \cdot 0,00086 \cdot 1706,9 = 1\,200\,000 \text{ грн}$$

где N₁ – тепловая мощность необходимая для поддержания температуры +18 °С, во всем корпусе, 190 кВт;

τ_1 – время работы системы отопления (круглосуточно), часы.

$$\tau_1 = 180 \cdot 24 = 4320$$

Z_T – стоимость тепловой энергии, грн/Гкал, Z_T = 1706,9

Стоимость отопления после модернизации:

$$C_2 = N_2 \cdot \tau_2 \cdot Z_e = 45 \cdot 2880 \cdot 2,71 = 351216 \text{ грн}$$

де N₂ – электрическая мощность необходимая для поддержания температуры +18 °С, во всем корпусе, 45 кВт;

τ_2 – время работы системы отопления (не работает ночью), часы.

$$\tau_2 = 180 \cdot 16 = 2880$$

Z_e – стоимость электрической энергии, грн/(кВт·ч), Z_e = 2,71

Годовой экономический эффект от термомодернизации:

$$E_p = (C_1 - C_2) - E_n \cdot KB = (1200000 - 351216) - 0,15 \cdot 4853423 = 120770 \text{ грн}$$

Срок окупаемости:

$$T = KB_3 / (C_1 - C_2) = 4853423 / (1200000 - 351216) = 5,7 \text{ года}$$

Литература

1. Мазуренко О. А. Порівняльний аналіз систем децентралізованого теплопостачання житлових будівель із використанням електроенергії [Текст] / О. А. Мазуренко, О. А. Климчук, О. М. Шраменко, О. А. Сичова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2014. - № 5(8). - С. 21-25.
2. Перетяка С.Н. Перевод учебного корпуса в здание с «нулевым» энергопотреблением [Текст] / Перетяка С.Н., Саченко В.В., Рейда Е.Ю. // Матеріали 6-ої міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві» (м. Одеса, 17-18 листопада 2016 р.): ОДАБА, Одеса, 2016. – С. 42 – 47.
3. Перетяка С.Н. Выбор системы отопления для учебного корпуса ОНАПТ [Текст] / Перетяка С.Н., Саченко В.В. // Збірник праць XVI Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв (м. Одеса, 5 – 9 вересня 2016): ОНАХТ, Одеса, 2016. – С. 357 – 360.
4. ДСТУ В.2.6.-31:2006 «Конструкція будівель і споруд Теплова ізоляція будівель»
5. СНиП 2.04.05-91 Отопление, вентиляция и кондиционирование

УДК 664.8.047:621.577

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОНАСОСНОГО СУШІННЯ
INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF
CONVECTIVE HEAT PUMP DRYING**

Дабіжа Н.О., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Dabizha N.O., PhD in engineering

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv

Анотація. Підвищення ефективності, надійності і безпеки роботи сушильного обладнання можливо вирішити шляхом застосування теплогенеруючих агрегатів теплонасосного типу, в яких здійснюється утилізація теплоти відпрацьованого сушильного агента. Використання теплонасосного циклу дозволяє повернути утилізовану теплоту в технологічний процес на більш високому температурному рівні. Застосування теплових насосів в конвективних сушарках з замкненим контуром циркуляції теплоносія дозволяє створювати контрольовані процеси зневоднення незалежно від погодних умов, забезпечує високу екологічну чистоту та скорочує витрати первинної енергії на вилучення вологи в 1,5-2,5 рази в порівнянні з традиційними конвективними сушарками.

Дослідження спрямовані на оптимізацію температурних параметрів дійсного теплонасосного циклу з метою скорочення енерговитрат на процес підготовки сушильного агента. За результатами аналітичних досліджень теплонасосного циклу отримані енергетичні показники процесу теплонасосного сушіння в залежності від тепловологісних параметрів сушильного агента та визначені оптимальні з точки зору енерговитрат режимні параметри процесу зневоднення. Показано, що енерговитрати в процесі теплонасосного сушіння в значній мірі залежать від вологовмісту та температури теплоносія. Чим більше осушується теплоносій, тим вищі енерговитрати на видалення вологи. При осушенні глибше за $d = 15$ г/кг с.п. енерговитрати різко зростають. Також величина енерговитрат на зневоднення зростає з підвищенням температури сушіння. Тому при застосуванні теплового насоса оптимальні температури сушіння становлять 50...55 °C. При раціональних режимах роботи теплового насоса може бути досягнуто зниження питомих енерговитрат на видалення вологи у 1,3-1,5 рази.

Запропоновані енергозберігаючі технологічні процеси тепловологісної обробки теплоносія з рекуперацією теплоти відпрацьованого сушильного агента. Розроблена схема включення теплонасосного агрегату у теплогенеруючу систему конвективної сушильної установки. Досліджений процес конвективного сушіння рослинних матеріалів в теплонасосній сушарці, запропонований енергозберігаючий режим зневоднення з перемінним ступенем осушення сушильного агента.

Abstract. Improving the efficiency, reliability and safety of operation of drying units can be obtained by applying heat generating units of heat pump type, in which the waste heat drying agent is utilized. Using a heat pump cycle allows to return utilizable heat into the manufacturing process at the higher temperature level. The use of heat pumps in convective dryers with a closed-loop circulation of the heat carrier can create controlled processes of dehydration regardless of weather conditions. Also high environmental cleanliness is provided and costs of primary energy for moisture removal are reduced in 1,5-2,5 times in comparison with conventional convective dryers.

The research is focused on the optimization of temperature parameters of the actual heat pump cycle in order to reduce energy consumption in heat drying agent treatment. The results of analytical studies of the heat pump cycle energy performances of heat pump drying process based on thermal and humidity parameters of drying agent were received and the optimum regime parameters of dehydration were defined. It is shown that energy consumption in heat pump drying depends on the moisture content and the temperature of the heat drying agent. The more the heat drying agent is dehumidified, the more energy for moisture removal is consumed. The energy consumption increases dramatically when dehumidification is deeper than $d = 15$ g/kg d.a. Also, the amount of energy consumption for dehydration increases with increasing drying temperature. Therefore, for heat pump dryers optimum drying temperatures are 50 ... 55 °C. At rational operation modes of the heat pump specific energy consumption for moisture removal can be reduced in 1,3-1,5 times.

Energy-saving technological processes of thermal and humidity treatment of the heat carrier with heat recovery of the waste drying agent are proposed. The scheme of inclusion of the heat pump unit in the heat generating system of the convection dryer is developed. The process of convective drying of plant materials in the heat pump dryer is studied. The energy-saving mode with drying agent humidity regulation is proposed.

Ключові слова: теплонасосні цикли, теплові насоси, сушіння, енергоефективність.

Key words: heat pump cycles, heat pump, drying, energy efficiency.

Сушіння є одним з найбільш інтенсивних та енергоємних технологічних процесів. Згідно із статистичними даними [1] на проведення процесів термічного зневоднення витрачається в середньому 12 % енергії, споживаної в промисловому секторі розвинених країн. Сушіння відіграє важливу роль в багатьох галузях промисловості, таких як деревообробна, текстильна, паперова, харчова та фармацевтична. Також сушіння широко використовується для збереження сільськогосподарської продукції, такої як фрукти, овочі, трави, зерно, насіння. В цих галузях на зневоднення витрачається 50-70 % від загальних енерговитрат на виробництво. Реалізуються ці процеси основною в конвективних сушильних установках тунельного, конвеєрного і стрічкового типів, завдяки простоті їхніх конструкцій і експлуатації, а також низькій вартості устаткування.

Необхідно зазначити, що традиційні конвективні сушильні установки вирізняються низькою енергетичною ефективністю, що пов'язана з великими (до 30 %) втратами теплоти. При цьому основна частина (до 70 %) теплоти втрачається з відпрацьованим сушильним агентом, що йде з сушарки. Виходячи з цього, стають очевидними принципові шляхи підвищення теплової економічності конвективних сушильних установок. Це – зниження втрат теплоти з сушильним агентом, що йде, або раціональне використання цього виду вторинних енергетичних ресурсів. В цьому випадку рекуперацію тепла відпрацьованого вологого теплоносія доцільно здійснювати за допомогою теплового насоса (ТН).

Традиційні конвективні сушарки за своїми конструктивними особливостями є найбільш пристосованими для інтеграції в сушильний цикл теплонасосного агрегату [2], а відпрацьований сушильний агент є тим видом вторинних енергетичних ресурсів, що слугує низькотемпературним джерелом енергії для теплового насоса. Застосування теплового насоса в замкнутому циклі конвективної сушарки дозволяє за рахунок конденсації вологи в випарнику ТН знижувати вологовміст сушильного агента, а також здійснювати утилізацію теплоти вологого повітря, що йде з сушарки, з наступним поверненням її в процес сушіння на більш високому температурному рівні.

Важливим чинником, на який в значній мірі впливають умови проведення процесу зневоднення, є якість готового продукту. Більшість матеріалів, що піддаються сушінню, є термолабільними. Особливістю таких матеріалів є залежність якості готового продукту від температурного рівня процесу та тривалості теплової дії. При перевищенні максимально допустимої температури відбуваються необоротні зміни фізичної та хімічної структури матеріалу, що у свою чергу призводить до погіршення якісних показників. Застосування теплового насоса дозволяє здійснити енергоефективний процес низькотемпературного сушіння (40-60 °C) термолабільних матеріалів.

Оскільки експлуатаційні характеристики теплонасосної сушарки визначаються тепло- і масообміном, який відбувається при взаємодії двох робочих тіл (повітря і холодоагенту), будь-яка зміна в одному з цих тіл неминуче впливатиме на всю систему. Так при конвективному сушінні інтенсивність видалення вологи з матеріалу залежить від виду продукту, температури і вологовмісту теплоносія. Проте, під час сушіння тепловологісні характеристики матеріалу змінюються, а температура охолодження сушильного агента і, відповідно, ступінь його зневоднення впродовж усього періоду сушіння матеріалу підтримуються незмінними. При такому режимі сушіння не забезпечується оптимальна швидкість процесу і мінімальні енерговитрати, тому що спочатку, коли матеріал має найбільшу вологість, з нього легко вилучається вільна волога, і не потрібно підтримувати високий ступінь осушення агента, а наприкінці процесу, коли в матеріалі залишається лише зв'язана волога, необхідно проводити більш глибоке осушення агента, тому що при невеликому ступені зневоднення агента тривалість останнього періоду сушіння значно збільшується. Це призводить до зайвих енерговитрат.

Тому метою дослідження є оптимізація температурних режимів роботи теплонасосного агрегату для скорочення енерговитрат в процесі конвективного сушіння.

Дослідження проводились для камерних конвективних сушильних установок з замкненим контуром циркуляції теплоносія. При цьому теплоносій циркулює по колу, а волога, що вилучається з матеріалу, не виноситься сушильним агентом в оточуюче середовище, а конденсується на холодній поверхні випарника теплового насоса і вилучається в скрапленому вигляді. Така схема роботи сушарки дозволяє використовувати як теплоносій крім повітря інертні газу, а також підтримувати необхідні параметри сушіння незалежно від тепловологісного стану атмосферного повітря.

Цикл сушіння в теплонасосних сушарках (рис. 1) здійснюється таким чином: нагріте і осушене повітря (стан а) надходить до сушильної камери 1, де, проходячи над шаром висушуваного матеріалу, адіабатично зволожується і охолоджується (стан б). Зволожене повітря осушується у випарнику теплового насоса 2 за рахунок охолодження (процес б–с–d) до заданої температури точки роси (стан d), при цьому волога, що міститься в повітрі, конденсується, і в рідкому стані виводиться до збірника конденсату 3. Далі холодне осушене повітря нагрівається в конденсаторі теплового насоса 5 (процес d–а) і повертається до сушильної камери 1.

Проведений аналіз процесу низькотемпературного зневоднення з використанням теплонасосного циклу [3, 4] показав, що в процесі теплонасосного сушіння величина поточних енерговитрат значною мірою залежить від вологовмісту сушильного агента і температурного режиму його осушення: чим вищий

вологості і температура зневоднення, тим менші питомі енерговитрати на видалення з нього води. При цьому для кожного тепловологісного стану повітря існує оптимальна температура охолодження (температура точки роси), при якій енерговитрати на осушення мінімальні. Теоретично даній умові задовольняє промінь процесу b–d, що проходить по дотичній до лінії $\varphi = 100\%$. Відповідно, точка дотику визначає оптимальну температуру точки роси. При меншій чи більшій глибині охолодження повітря тепловитрати на осушення збільшуються. У дійсному циклі режим осушення повітря необхідно оптимізувати з урахуванням електроспоживання компресора холодильної машини, тобто з урахуванням залежності величини питомої холодопродуктивності від температур випаровування і конденсації холодоагенту.

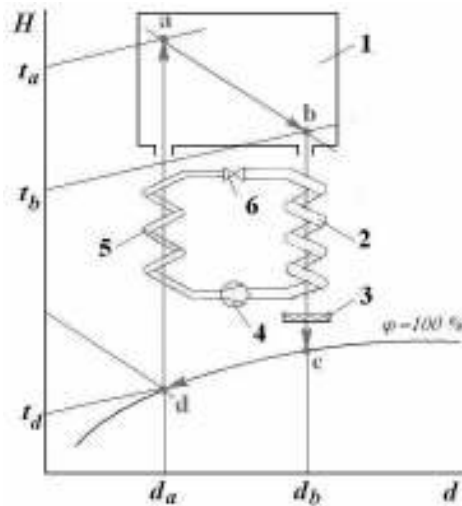


Рис. 1 – Процес теплонасосного сушіння в H-d діаграмі: 1 – сушильна камера; 2 – випарник; 3 – збірник конденсату; 4 – компресор; 5 – конденсатор; 6 – дросель

Розрахункові дослідження [4] показують, що при раціональних режимах роботи теплові насоси дозволяють у декілька разів зменшити питомі енерговитрати на видалення води в процесах конвективного сушіння. В циклі теплонасосного сушіння осушення теплоносія, після його проходження над висушуваним продуктом (рис. 1, процес a–b), може бути здійснено такими шляхами:

- а) з осушенням усього теплоносія, коли весь потік відпрацьованого зволоженого теплоносія охолоджується у випарнику ТН до заданої температури точки роси, після чого осушений теплоносій нагрівається в конденсаторі ТН і повертається до сушильної камери;
- б) з осушенням частини теплоносія, коли відпрацьований теплоносій розділяється на два потоки, один з яких піддається глибокому охолодженню, після чого змішується з частиною вологого теплоносія, і нагрівається в конденсаторі ТН;
- в) з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду, коли відпрацьований теплоносій розділяється на два потоки, один з яких охолоджується аналогічно попередньому варіанту. Далі холодний осушений потік вступає в теплообмін з потоком, що надходить на охолодження, і після змішування з частиною вологого теплоносія подається на нагрівання до конденсатора ТН.

У всіх варіантах, незалежно від режиму видалення води, можливо досягти однакового ступеня осушення теплоносія. Проте це не означає, що енерговитрати на осушення також будуть однакові – залежно від співвідношення температур у випарнику і конденсаторі тепловий коефіцієнт циклу і, відповідно, витрата енергії на привід теплового насоса в даних випадках може значно розрізнятися. Порівняння даних режимів підготовки теплоносія за енерговитратами показало, що при роботі теплонасосного агрегату за варіантом в) досягаються найменші витрати енергії. Так, при середній ефективності рекуператора $E = 0,4$ при роботі теплонасосного агрегату з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду енергоспоживання зменшується в 1,3-1,5 рази, і навіть при невисокій ефективності рекуператора вигода від його застосування значна, особливо в області низьких вологовмістів сушильного агента. В порівнянні з традиційними конвективними сушарками при теплонасосному сушінні можливо знизити питомі енерговитрати на видалення води у 1,5-2 рази.

Для аналізу енергетичних показників та оптимізації процесу сушіння розроблена математична модель розрахунку зневоднення теплоносія в H-d діаграмі [5]. Як похідні дані задаються початкова температура та вологовміст сушильного агента на вході в сушильну камеру та температура вологого сушильного агента на виході із сушильної камери. Параметри всіх інших ключових точок процесу розраховуються за програмою, що дає змогу визначити енергетичні показники теплонасосного циклу в залежності від тепловологісних параметрів теплоносія. Результати розрахункового дослідження впливу тепловологісних параметрів теплоносія на енерговитрати на видалення води наведені на рис. 2, 3.

У найбільшій мірі на величину поточних енерговитрат впливає ступінь вологовмісту осушуваного теплоносія (рис. 3). Це пояснюється тим, що зі зниженням його вологовмісту збільшується доля енергії, яка витрачається непродуктивно на охолодження і нагрівання маси повітря. При осушенні глибше за $d = 15$ г/кг с.п. енерговитрати різко зростають, тому при виборі оптимального тепловологісного стану теплоносія необхідно керуватися даними з гіротермічної рівноваги та кінетики сушіння певного матеріалу [13]. Для забезпечення оптимальної інтенсивності масообміну і мінімальних енерговитрат доцільно проводити процес сушіння зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента.

Важливе значення має також оптимізація температурного режиму процесу сушіння. Зниження температури теплоносія до 45-50 °C дозволяє зменшити поточні енерговитрати практично в два рази (рис. 4), однак при цьому подовжується час сушіння. Тому управління температурою і вологовмістом теплоносія впродовж

процесу сушіння має бути організовано таким чином, щоб мінімізувати енерговитрати в розрахунку на весь період сушіння.

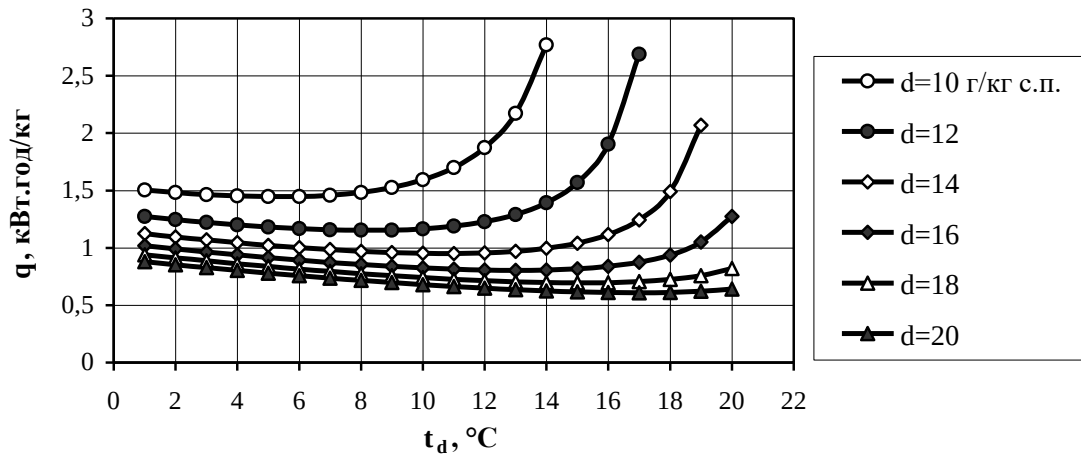


Рис. 2. Вплив вологовмісту осушувача на енерговитрати процесу видалення вологи.

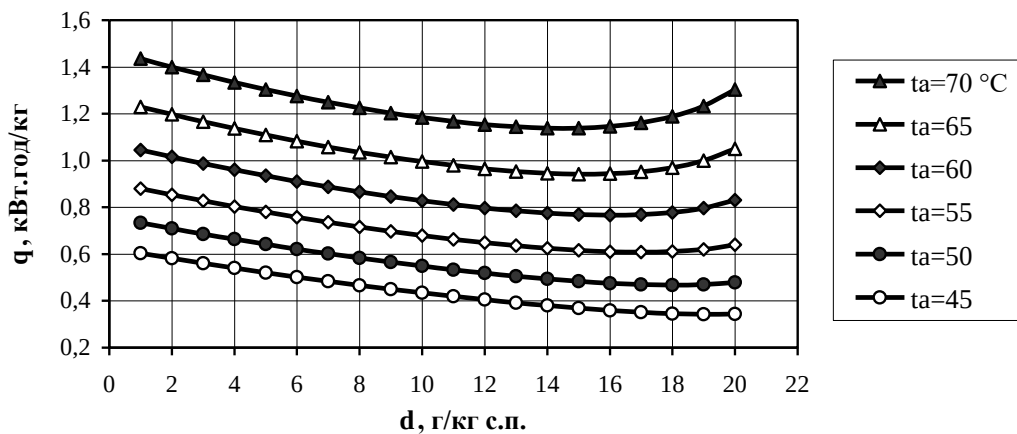


Рис. 3. Вплив температури сушіння на енерговитрати процесу видалення вологи (при ефективності рекуператора $E = 0,7$).

На основі аналізу технологічних схем конвективних сушарок з тепловими насосами та за результатами аналітичних досліджень процесів теплонасосного сушіння розроблена схема включення теплонасосного агрегату в систему конвективної сушильної установки для зневоднення ККП матеріалів. Конвективна сушарка з теплонасосною системою підготовки теплоносія та процес сушіння в Н-d діаграмі показані на рис. 4. Сушарка (рис. 4, а) являє собою шафу, в верхній частині якої знаходиться сушильна камера 2 з піддонами 4 для зневоднюваного матеріалу, а в нижній – агрегатний відсік 3, де розташований теплонасосний агрегат. Теплонасосний агрегат включає холодильний компресор, випарник із системою відводу конденсату до конденсатозбірника і двосекційний повітряний конденсатор. Сушильна камера і агрегатний відсік пов'язані між собою повітропроводами. Сушарка обладнана рекуперативним теплообмінником 7, зовнішній вигляд якого надано на рис. 4, б. Теплообмінник виконаний з полікарбонатного листа.

Сушіння відбувається в замкненому контурі. Зневоднюваний матеріал розміщується на піддонах і завантажуються в технологічний відсік сушарки. При запуску циркуляційних вентиляторів потік сушильного агента прямує в технологічний відсік сушарки і проходить над зневоднюваним матеріалом (рис 4, в, процес а-б). При контакті з матеріалом сушильний агент зволожується та охолоджується. Відпрацьований сушильний агент прямує до агрегатного відсіку сушарки, де розподіляється на два потоки, один із яких повертається на рециркуляцію, а другий подається в тепловий насос на осушення. Осушене повітря спочатку частково охолоджується в рекуперативному теплообміннику «повітря-повітря» (процес b-c'), після чого доохолоджується у випарнику теплового насоса (процес c-c'-d). При цьому частина вологи, що міститься в повітрі, конденсується, і вода виводиться з об'єму сушильної камери. Після проходження через випарник охолоджене й осушене повітря підігрівається в рекуператорі (процес d-e) і змішується з вологим

рециркулюючим повітрям (процеси e-f і b-f). Змішане повітря (точка f) підігрівається в конденсаторі (процес f-a), і подається знову в контур циркуляції сушильного агенту.

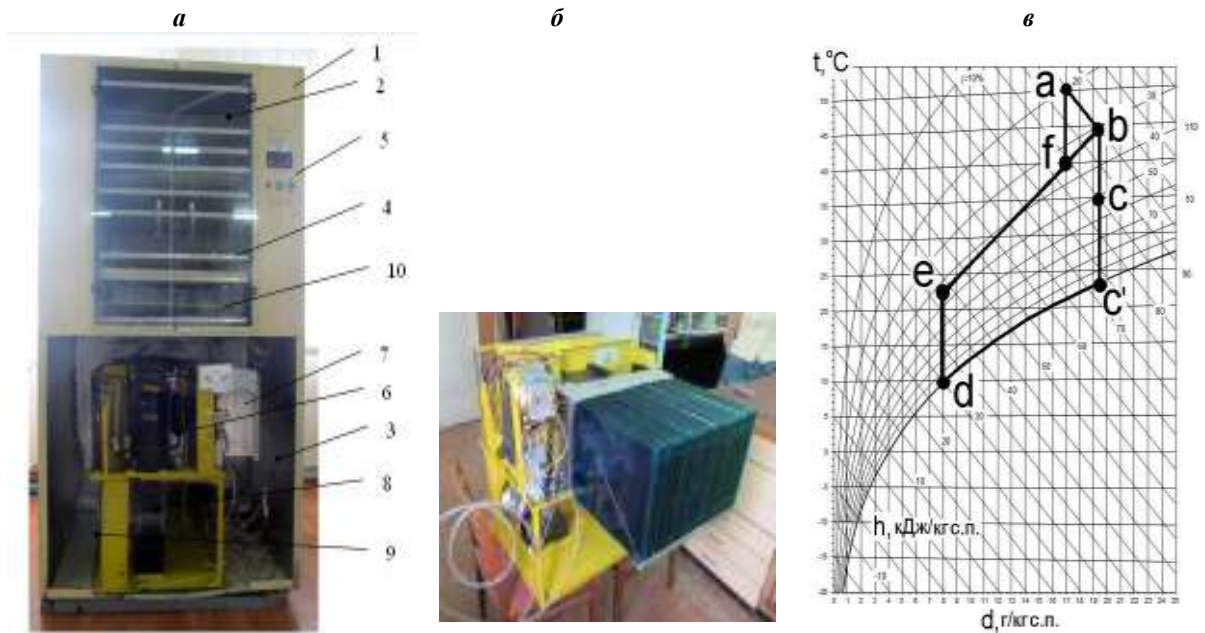


Рис. 4 – Експериментальна теплонасосна сушильна установка (а), рекуперативний теплообмінник (б) та процес теплонасосного сушіння в Н-d діаграмі (в): 1 – корпус сушарки; 2 – сушильна камера (технологічний відсік); 3 – агрегатний відсік; 4 – піддон; 5 – пульт керування сушарки; 6 – теплонасосний агрегат; 7 – рекуператор; 8 – циркуляційні вентилятори; 9 – стартовий електронагрівач; 10 – ПЧ-нагрівач

Підчас випробувань теплонасосної сушарки проводилось автоматичне вимірювання температури теплоносія в основних точках процесу (рис. 6): після випарника та конденсатора ТН, на вході в рекуперативний теплообмінник та на виході з нього. Контроль вологості сушильного агента здійснювався за допомогою «сухого» та «мокрого» термометрів. Фіксувалося енергоспоживання компресора в продовж всього процесу сушіння.

Як видно з рис. 6, після виходу на стаціонарний режим у випарнику ТН підтримувалась температура на рівні $10\text{ }^\circ\text{C}$.

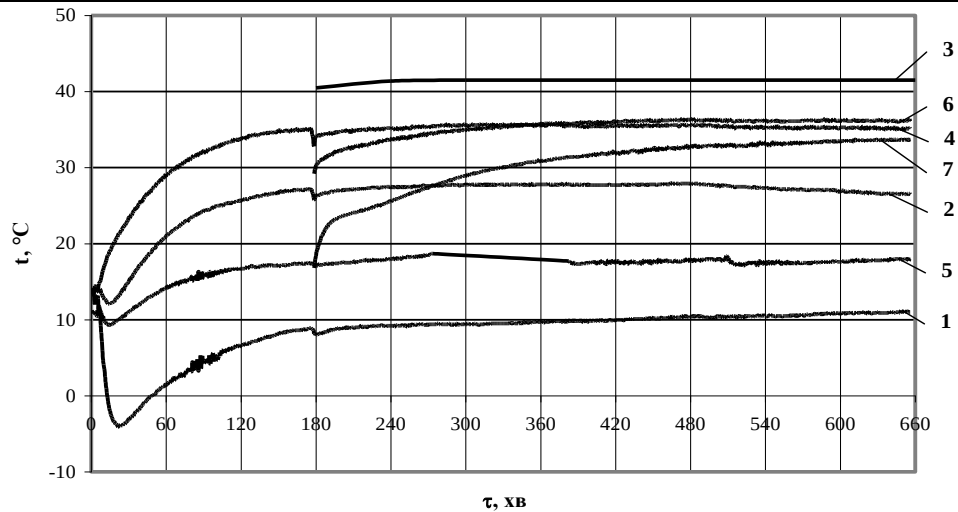


Рис. 6 – Температурні криві процесу теплонасосного сушіння: 1 – температура теплоносія після випарника ТН; 2 – температура теплоносія після рекуператора; 3 – температура теплоносія після конденсатора ТН; 4 – температура «сухого» термометра; 5 – температура «мокрого» термометра; 6 – температура матеріалу на поверхні зразка; 7 – температура матеріалу в центрі зразка

За рахунок теплообміну холодного і гарячого потоків теплоносіїв, що подається на охолодження до випарника, попередньо охолоджується у рекуперативному теплообміннику з 35 °С до 18 °С. Таким чином, знімається теплове навантаження на випарник ТН. Ефективність рекуперативного теплообмінника становить 0,65.

Висновки

1. Використання теплових насосів як теплогенераторів в конвективних сушильних установках дозволяє утилізувати теплоту відпрацьованого теплоносія і повернути її в процес сушіння на більш високому температурному рівні. Це дозволяє знизити енерговитрати на процес конвективного сушіння в 1,5-2,5 рази.
 2. Для кожного заданого тепловологісного стану сушильного агента відповідно існує оптимальний температурний режим роботи теплового насоса, який забезпечує мінімальні енерговитрати на сушіння.
 3. Енерговитрати в процесі теплонасосного сушіння в значній мірі залежать від вологовмісту та температури теплоносія. Чим більше осушується теплоносієм, тим вищі енерговитрати на видалення вологи. При осушенні глибше за $d = 15$ г/кг с.п. енерговитрати різко зростають. Також величина енерговитрат на зневоднення зростає з підвищенням температури сушіння. Тому при застосуванні теплового насоса оптимальні температури сушіння становлять 50...55 °С.
 4. Застосування рекуперативного теплообмінника дозволяє в залежності від його ефективності в 1,5-2 рази зменшити енерговитрати на процес сушіння.
- Дослідження проводяться в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (Ресурс-2) (проект Р 5.8).

Література

1. Kudra T. Energy Aspects in Food Dehydration. *Advances in Food Dehydration* / Ed. Cristina Ratti. CRC Press, 2009. P. 423-445.
2. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Шапар Р.О., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. Використання теплових насосів в процесах сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28, № 2. С. 106-110.
3. Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.А., Шаврін В.С., Хавін А.А. Оптимизация режимов работы теплонасосной конденсационной сушильной установки. *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)*: труды 1-й Междунар. научно-практич. конф. – Москва, 2002. Т. 4. С.234-236
4. Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Дабига Н.А., Гатилов К.А. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип.30, Т.1. С. 185-189.
5. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2017. Т. 39, № 3. С. 39-44.
6. Дабига Н.А. Энергоэффективная технология сушки термолabileльных материалов с использованием тепловых насосов. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 39, Т. 2. С. 341-345.

УДК 536.27

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ
ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ENERGY EFFICIENT SHELL-
AND-TUBE HEAT EXCHANGERS FOR HIGH MINERALIZED MEDIA**

Чалаєв Д.М. канд. техн. наук, пров. наук. співр., **Шматок О.І.** канд. техн. наук, пров. наук. співр.,
Грабова Т.Л. канд. техн. наук, пров. наук. співр., **Сильнягіна Н.Б.** стар. наук. співр.

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Chalaev D.M., PhD Candidate, Leading Researcher, **Shmatok O.I.**, PhD Candidate, Leading Researcher, **Grabova T.L.**, PhD Candidate, Leading Researcher, **Silnyagina N.B.**, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine Kyiv, Ukraine

Анотація. У харчовій промисловості часто використовують теплову обробку рідких продуктів в трубчастих теплообмінниках. Основною вимогою для теплообмінників є висока теплопередаюча здатність і низькі втрати на гідравлічний опір. При цьому теплообмінник повинен бути максимально компактним і легким. Виконати ці суперечливі вимоги можливо тільки використовуючи інтенсифікацію теплообміну. Ефективним способом поліпшення теплогідравлічних характеристик теплообмінників є використання в них профільованих теплопередаючих поверхонь різноманітних модифікацій. Одним із варіантів профільованої тепло передаючої поверхні є гофровані тонкостінні труби з нержавіючої сталі. Гофровані труби забезпечують турбулентність поблизу поверхні стінки труби, тим самим зменшують товщину теплового пограничного шару. Турбулізація рідини поблизу стінки труби, завдяки відривним збуренням від стінки до основного потоку, збільшує загальний коефіцієнт теплопередачі в теплообмінних системах. У роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень інтенсивності теплопередачі при використанні тонкостінних гофрованих труб різних модифікацій для роботи на модельних теплоносіях, що мають підвищену густину і в'язкість (в якості модельного середовища був взятий високомінералізований розчин з вмістом солей 250 г/кг). Порівняльний аналіз режимів роботи теплообмінника з гофрованою внутрішньою трубою різних модифікацій і теплообмінника з гладкою внутрішньою трубою при роботі на модельних теплоносіях показали, що не дивлячись на підвищену густину і в'язкість високомінералізованого розчину порівняно з водою, профільовані труби утворюють ефективну турбулізацію пристінного шару і забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі. На підставі отриманих даних створено ефективний теплообмінник, в якому в якості теплообмінних елементів використовуються тонкостінні гнучкі нержавіючі профільовані труби з можливістю працювати з середовищами, що мають різноманітний хімічний склад і підвищену в'язкість. Даний теплообмінник призначений для вирішення стандартних теплотехнічних задач з врахуванням властивостей робочих середовищ

Abstract. The heat treatment of liquid products in tubular heat exchangers is often used in the food industry. The high heat exchange efficiency and low losses for hydraulic resistance are the main requirements for heat exchangers. In this case, the heat exchanger should be as compact and light as possible. In order to achieve these contradictory requirements is possible only by using intensification of heat exchange. The use of corrugated heat transfer surfaces of various modifications is an effective way to improve the thermal and hydraulic characteristics of heat exchangers. One of the variants of the heat transfer surface is corrugated thin-walled stainless steel tube. Corrugated tubes provide turbulence near the surface of the tube wall, thereby reducing the thickness of the thermal boundary layer. Liquid turbulence near the tube wall, due to tear-off disturbances from the wall to the main flow increases the overall heat transfer coefficient in heat exchange systems. The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the intensity of heat transfer using thin-walled corrugated tubes of various modifications for operation on model heat carrier with high density and viscosity (high mineralized solution with a salt content of 250 g/kg was used as a model solution). A comparative analysis of the operating conditions of a heat exchanger with a corrugated inner tube of various modifications and a heat exchanger with a smooth inner tube was conducted. Despite the increased density and viscosity of the high mineralized solution in comparison with water, the corrugated tubes form an effective turbulence of the wall layer and provide high heat transfer coefficients when operating with model heat carrier. An efficient heat exchanger, in which thin-walled flexible stainless corrugated tubes are used as heat exchange elements, with the ability to work with different chemical composition and high-viscosity media is created on the basis of the obtained data. The heat exchanger is designed to solve standard heat engineering tasks taking into account the properties of working media.

Ключові слова: теплообмінник, гофровані труби, дискретні турбулізатори, гідравлічний опір, коефіцієнт теплопередачі.

Keywords: heat exchanger, corrugated tubes, discrete turbulators, hydraulic resistance, heat transfer coefficient.

Теплообмінні апарати займають важливе місце в промисловості і складають велику групу теплосилового обладнання, займаючи значні виробничі площі та перевищуючи найчастіше 20 % вартості загальної комплектації в теплоенергетиці, хімічній, нафтопереробній, харчовій промисловостях і ряді інших галузей [1, 2].

Створення сучасного теплообмінного обладнання – завдання складне і багатопланове. Необхідність скорочення витрати енергії й матеріалів, а також зниження вартості теплообмінного устаткування обумовило розширення робіт, спрямованих на інтенсифікацію процесу теплообміну, зниження маси й габаритів теплообмінників, зниження витрат енергії на здійснення процесів теплопередачі. Однак, на сьогоднішній день вважається майже вичерпані резерви реальної раціоналізації конструкцій теплообмінників [3].

Основною вимогою для теплообмінників є висока теплопередаюча здатність, низькі втрати на гідравлічний опір, при цьому вони повинні бути як можна більш компактними і легкими. При вирішенні стандартних теплотехнічних задач з використанням теплообмінників потрібно враховувати властивості робочих середовищ і можливість роботи з забрудненими середовищами. Актуальною проблемою є забруднення і чищення теплообмінного устаткування. Існуючі технології чистки нерозривно пов'язані з витратами праці, додатковими витратами палива, хімреагентів, з питаннями охорони навколишнього середовища. Вирішити ці суперечливі питання можливо тільки при застосуванні новітніх дослідно-конструкторських розробок і технологій, які дозволяють отримувати максимальну ефективність теплообміну при зниженні габаритних розмірів, а також високу надійність в експлуатації та обслуговуванні теплообмінних апаратів.

У харчовій промисловості часто використовують теплову обробку різноманітних продуктів в трубчастих теплообмінниках [4-6]. Наприклад при переробці молока або молочних продуктів широко використовуються теплообмінники для нагріву або охолодження продуктів на різних технологічних стадіях. У деяких випадках продукти мають високу в'язкість, відмінну від молока такі як вершки, сироватка, йогурти, десерти, суміші для морозива, згущене молоко, кефір, вершкове масло, молочні концентрати, дитяче харчування і багатьох інших молочних продуктів, для яких потрібна делікатна термообробка в теплообмінниках. У лікєро-горілчаному виробництві теплообмінники використовуються при охолодженні цукрового сиропу на стадії його перекачування в проміжний збірник. Крім того, наливки та настоянки перед розливом необхідно охолодити, що також здійснюється за допомогою теплообмінників. Процеси теплообміну незамінні і на пивоварному виробництві, гаряче пивне сусло перед бродінням необхідно швидко охолодити для запобігання розвитку шкідливих мікроорганізмів. Застосування теплообмінників затребуване і в масложировій промисловості для нагрівання, рекуперації і охолодження рослинного масла. Також теплообмінні апарати активно використовуються на підприємствах з розливу питної бутильованої і мінеральної води. Теплообмінне обладнання в харчовій промисловості застосовується в багатьох технологічних завданнях, при цьому продукти, які піддаються термообробці знаходяться в різних агрегатних станах, з різним хімічним складом середовищ і мають різні реологічні властивості.

Більшість існуючого теплообмінного обладнання не враховує властивості робочих середовищ, тому працюють нестабільно. Наприклад, пластинчасті теплообмінники здатні працювати виключно з чистими середовищами, тому однією із переваг кожухотрубчастих апаратів є те, що вони не потребують чистого робочого середовища, і можуть ефективно працювати з середовищами, які мають різноманітний хімічний склад і підвищену в'язкість.

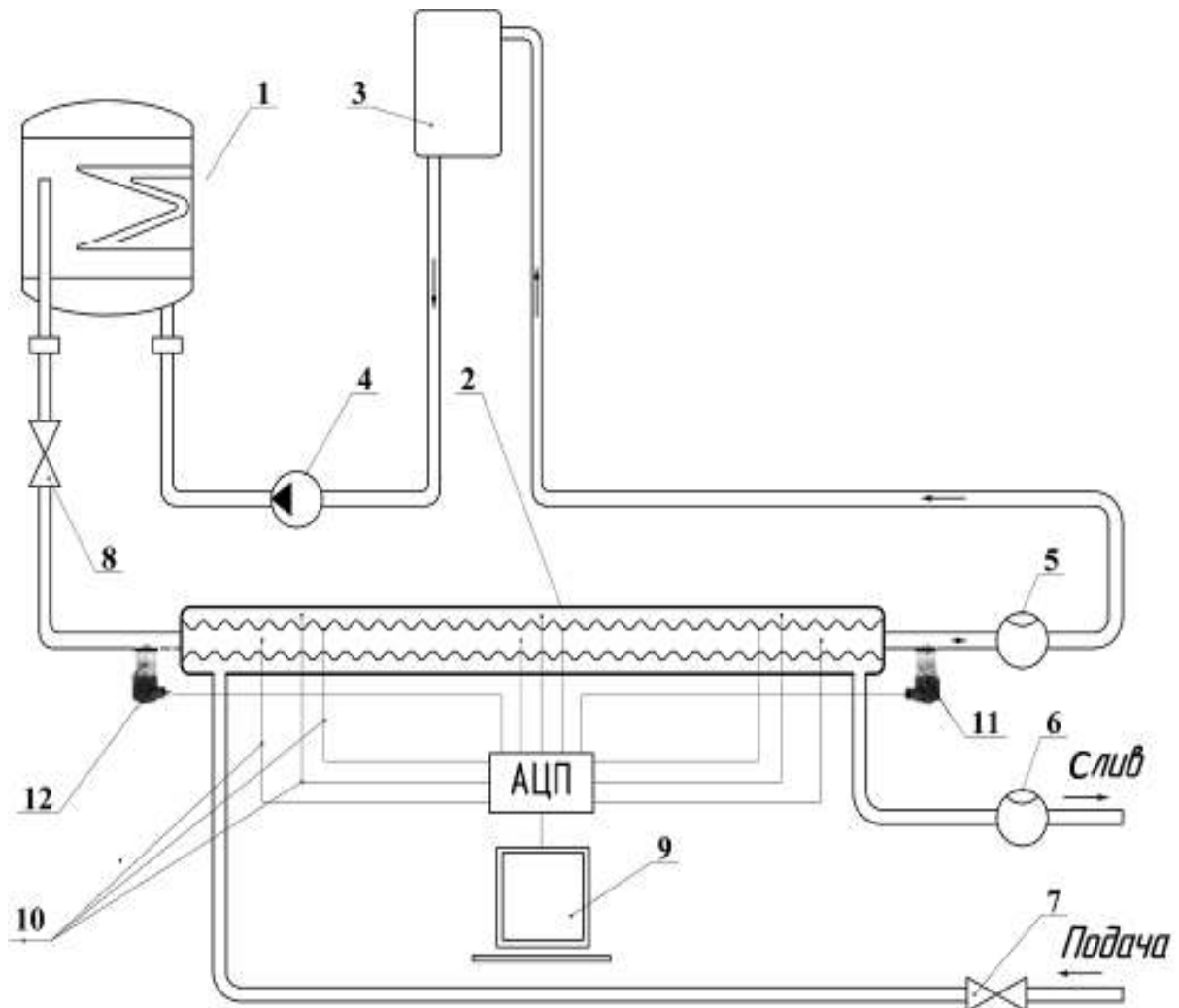
В останні роки вітчизняною промисловістю освоєне виробництво гнучких нержавіючих профільованих труб невеликого діаметра [7]. Така теплообмінна поверхня характеризується компактністю, невисокою питомою вартістю, можливістю створення складних теплообмінних поверхонь за рахунок «згину» теплообмінної поверхні і закрутки пучка профільованих труб. Гофровані труби забезпечують турбулентність поблизу поверхні стінки труби, тим самим зменшуючи товщину теплового пограничного шару. В результаті покращується перемішування рідини поблизу стінки труби, завдяки відривним збуренням від стінки до основного потоку, тим самим відбувається збільшення загального коефіцієнта теплопередачі в теплообмінних системах. Однак, в даний час в літературі практично відсутні надійні дані по теплообміну і гідравлічному опору для профільованих труб при роботі на модельних теплоносіях, що мають підвищену в'язкість. Це ускладнює проектування теплообмінних апаратів і оптимізацію їх параметрів. Для вирішення даного завдання в ІТТФ НАН України створено експериментальний стенд (рис. 1) і проведені дослідження інтенсивності теплопередачі при використанні тонкостінних гофрованих труб різних модифікацій для роботи на модельних теплоносіях з підвищеною в'язкістю (в якості модельного середовища був взятий високомінералізований розчин (250 г/кг)).

Стенд обладнаний приладами, які дозволяють вимірювати параметри необхідні для теплового розрахунку теплообмінника.

Порівняльний аналіз режимів роботи теплообмінника з гофрованою внутрішньою трубою різних модифікацій і теплообмінника з гладкою внутрішньою трубою при роботі на модельних теплоносіях показали, що не дивлячись на підвищену в'язкість високомінералізованого розчину порівняно з водою,

профільовані труби утворюють ефективну турбулізацію пристінного шару і забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі. При швидкостях теплоносія в трубах 0,5 – 1,1 м/с середня величина коефіцієнта тепловіддачі високомінералізованого розчину складає 4500 Вт/м²·К (рис. 2 і рис 3).

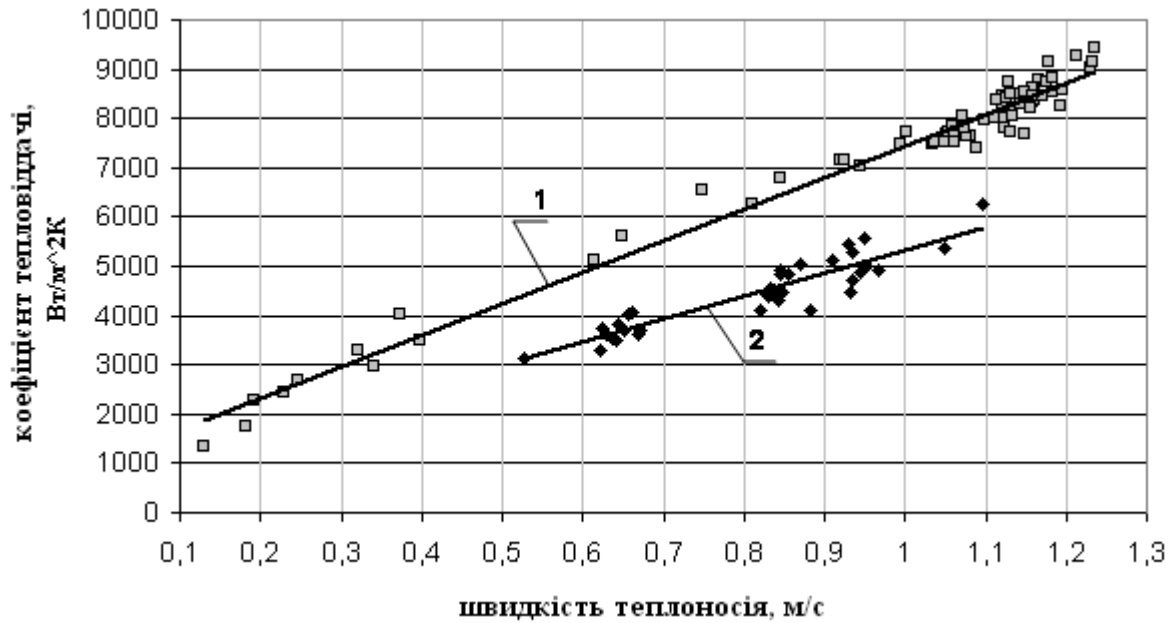
Результати порівняльних випробувань трубчатого теплообмінника з профільованою внутрішньою трубою при роботі на системах «вода – вода» і «високомінералізоване середовище – вода» показали, що лімітуючий фактор теплообміну приходить на складову всередині труби. Залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості теплоносія для цих систем дана на (рис. 4). Отримані дані дозволяють оптимізувати співвідношення перерізу внутрішнього і кільцевого каналу при проектуванні трубчатих теплообмінників для високо мінералізованих середовищ.



1 – теплоізований бойлер; 2 – теплообмінник типу "труба в трубі" з гофрованою внутрішньою трубою (з можливістю заміни на труби з іншою геометрією); 3 – розширювальний бак; 4 – циркуляційний насос; 5 – лічильник витрат гарячого теплоносія; 6 – лічильник витрат холодного теплоносія; 7 – вентиль подачі холодного теплоносія; 8 – вентиль подачі гарячого теплоносія; 9 – персональний комп'ютер; 10 – термопари хромель-копель (ХК) для визначення температури теплоносіїв на вході і виході (в трубному і міжтрубному просторах і на стінках труби) теплообмінника; 11, 12 – датчики для вимірювання тиску на вході і виході трубного простору теплообмінника; в основу апаратної частини вимірювальної системи введено аналого-цифровий перетворювач типу І-7018

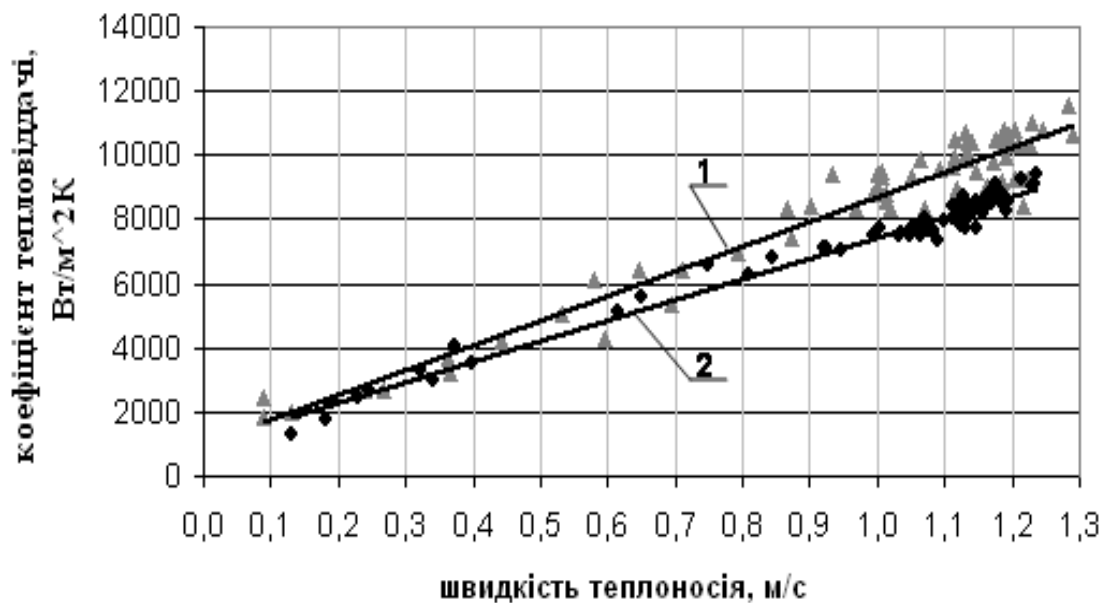
Рис. 1 – Принципова схема лабораторного стенду для експериментального дослідження гідродинамічних і теплообмінних процесів в теплообмінниках на основі труб з різною геометрією для роботи на модельних теплоносіях

Теоретичні [7] та експериментальні дослідження показали перспективність даного напрямку і дозволили створити ефективний теплообмінник, в якому в якості теплообмінних елементів використовуються тонкостінні гнучкі нержавіючі профільовані труби з можливістю працювати з середовищами що мають різноманітний хімічний склад і підвищену в'язкість. Даний теплообмінник призначений для вирішення стандартних теплотехнічних задач з врахуванням властивостей робочих середовищ і оточуючих умов як охолоджувачів масла, води та інших рідин.



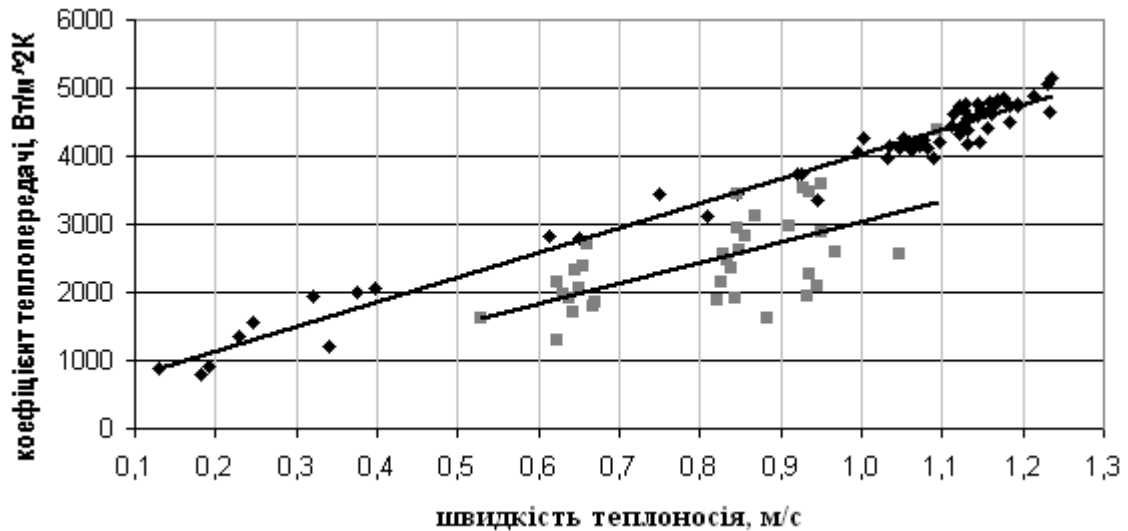
1 – вода; 2 – високо мінералізоване середовище.

Рис. 2 – Залежність коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості теплоносія в трубі з профільованою поверхнею для води і високо мінералізованого середовища



1 – кільцевий канал; 2 – профільований канал.

Рис. 3 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості течії теплоносія в профільованій трубі і в кільцевому каналі



1 – система теплоносія вода – вода; 2 – систем високомінералізоване середовище – вода.

Рис. 4 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості теплоносія в теплообмінниках на основі профільованої поверхні для систем теплоносія вода – вода та вода – високомінералізоване середовище

Ефективна турбулізація потоку теплоносія і створення режиму автоколивань теплообмінних трубок сприяють попередженню утворення відкладень на стінках труб, тому вирішується актуальна проблема забруднення і чищення теплообмінного обладнання, можлива експлуатація теплообмінників з інтенсифікаторами теплообміну без операцій очищення апаратів протягом всього періоду роботи, так як товщина забруднень в трубках з виступами після певного проміжку часу роботи практично стабілізується на допустимому рівні.

Дослідження проводяться за підтримки програми наукових досліджень НАН України «Ресурс-2» (проект Р 5.5)

Висновки.

Застосування гнучких нержавіючих профільованих труб в теплообмінних апаратах дозволяє створити високу турбулентність потоку при відносно низьких швидкостях теплоносія, що забезпечує великі коефіцієнти теплопередачі в апараті навіть при використанні високомінералізованих і в'язких середовищ. Результати дослідження експериментального зразка трубчастого теплообмінника і досягнуті значення коефіцієнта теплопередачі (більше 3000 Вт/м²К при мінералізації теплоносія близько 250 г/кг) ілюструють потенціал пропонованого підходу і можуть бути використані для розрахунку і проектування теплообмінників, призначених для застосування в енергетиці, харчовій промисловості, геотермальній енергетиці та ін.

Література

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З. и др. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 407 с.
2. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 143 с.
3. Дрейцер Г.А. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 4. С. 33.
4. Долінський А.А. Розробка ефективних теплообмінників нового покоління на основі труб з дискретними турбулізаторами / Чалаев Д.М., Грабов Л.Н., Переяславцева О.О., Сильнягіна Н.Б., Ковальов В.В. // Энергетика та електрифікація. - 2013. - Т.13. - № 4. -С. 28-33.
5. Грабов Л.М., Чалаев Л.М., Переяславцева Е.А., Сиильнягина Н.Б. Разработка конкурентноспособных трубчатых теплообменных аппаратов //Наукові праці ОНАХТ.-Одесса: 2014. – Вип. 45, том 2 – С. 93-97.
6. Сильнягина Н.Б., Чалаев Д.М., Ковалев В.В. Создание высокоэффективных теплообменных аппаратов на основе труб с дискретными турбулизаторами для коммунальной энергетики. IX Міжнародна конференція «Проблеми промислової теплотехники» (Київ, 20-23 жовтня 2015) // Електронне видання, с. 61-62

<http://www.eco-flex.com.ua> (дата звернення: 05.01.2017)

ПОГЛИНАННЯ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ ІЗ СУМІШІ ПОВІТРЯ З ДІОКСИДОМ СУЛЬФУРУ

Дячок В. В. д-р. техн. наук, професор, Гуглич С. І. канд. техн. наук, доцент,
Катишева В. В. аспірант, Мандрик С. Т. магістр
Національний університет "Львівська Політехніка", м. Львів

EXTRACTION OF SUGAR GAS FROM MIXTURES WITH DIOXIDE SULFUR

Deacock V.V. Dr. Tech. Sciences, professor,
Guglich S.I. Cand. Tech. Sciences, associate professor
Katysheva V.V. postgraduate student, Mandryk S.T., master's degree
National University "Lviv Polytechnic", Lviv

Анотація: Сучасні технології потребують новітніх процесів утилізації, проте більшість із них також дають відходи, які не завжди легко утилізуються. Натомість усі процеси, що відбуваються у живій природі, є циклічними і добре збалансованими. Перетворення речовини в екосистемах реалізується шляхом кругообігу – відходи одних процесів використовуються в інших біологічних процесах.

Типовим прикладом таких процесів, може бути трансформація вуглекислого газу у біомасу із застосуванням фотосинтезу у промислових умовах. Проте, промислові газові викиди окрім вуглекислого газу завжди містять певну кількість діоксиду сірки. Тому важливо досліджувати вплив цього компонента на процеси фотосинтезу. Водорості, як і інші зелені рослини поглинають вуглекислий газ, а також невелику кількість мінеральних речовин перетворюючи його у біомасу. На відміну від наземних рослин вони ростуть у 7-10 разів швидше і відповідно «нейтралізують» більше вуглекислого газу та володіють здатністю адаптуватися у край несприятливих умовах. Ці властивості мікрроводоростей є об'єктивною умовою для впровадження таких технологій з метою очищення промислових газових викидів від вуглекислого газу.

Представлені результати експериментальних досліджень вивчення динаміки поглинання вуглекислого газу із повітря хлорофілсинтезуючими мікрроводоростями за умови присутності в ньому діоксиду сірки. Теоретично обґрунтовано на основі теорії Лайнуївера-Берка та експериментально доведено наявність неконкурентного, зворотнього, інгібування діоксиду сірки у процесі фотосинтезу. Приведено математичний опис приросту клітин мікрроводоростей та в результаті обробки експериментальних даних визначені коефіцієнти приросту біомаси мікрроводоростей за певних значень концентрації інгібітора. На основі отриманих значень виведено аналітичну залежність коефіцієнту приросту біомаси від вмісту інгібітора. Встановлено максимальне значення концентрації діоксиду сірки за якого може відбуватись фотосинтез та приріст біомаси мікрроводоростей.

За таких обставин доведена можливість керування технологіями очищення промислових газових викидів з використанням хлорофілсинтезуючих мікрроводоростей, як основний біологічний об'єкт трансформування вуглекислого газу у джерело енергії.

Abstract: Modern technologies demand the latest recycling processes, but most of them also provide waste which is not always easy to dispose of. But all the processes occurring in nature are cyclical and well-balanced. The transformation of matter in ecosystems is realized by the cycle – the waste of one process are used in other biological processes.

A typical example of such process can be the transformation of carbon dioxide into biomass using photosynthesis in an industrial environment. However, the industrial gas emissions include not only carbon dioxide but sulfur dioxide. That's why it is important to research the influence of this component on the process of photosynthesis. Algae like other green plants need carbon dioxide and a small amount of minerals for increasing their biomass. They grow 7-10 times faster than terrestrial plants and thus «kill» more carbon dioxide and have the ability to adapt to unfavorable conditions. These properties of microalgae are the objective condition for the introduction of such processes in order to eliminate CO₂ from industrial gas emissions.

The results of experimental research to study the dynamics of absorption of carbon dioxide gas from microalgae provided the presence of sulfur dioxide in it. The presence of non-competitive reverse inhibition by sulfur dioxide in the process of photosynthesis based on the Lineweaver-Burk theory was theoretically justified and experimentally proved. The mathematical description of the growth of the cells of the microalgae is given and as a result of processing experimental data the growth rates of the algae at certain values of inhibitor concentration was defined. Based on the obtained values the analytical dependence of growth rate of biomass from the substance of inhibitor was deduced.

The maximum value of concentration of sulphur dioxide which may occur photosynthesis and biomass growth of microalgae was set.

In such circumstances, proven ability to manage technology treatment of industrial gas emissions using microalgae chlorofilsyntezyuchyh as basic biological object transform carbon dioxide into energy.

Ключові слова: фотосинтез, вуглекислий газ (CO₂), діоксид сульфору (SO₂), мікроводорості, дифузія, математична модель, кінетика, ферментативний каталіз, інгібітор.

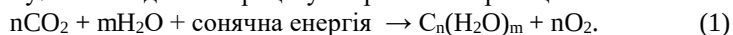
Keywords: photosynthesis, sulfur dioxide (SO₂), microalgae, diffusion, mathematical model, kinetics, enzymatic catalysis, inhibitor.

Постановка проблеми. Добре відомо, що переважна більшість створених сучасною цивілізацією технологій є незамкненими процесами, які утворюють певні відходи. Шкідливість і небезпечність тієї чи іншої технології для навколишнього середовища визначаються насамперед кількістю та природою речовин, які є побічним продуктом – відходами технологічного процесу. Питання «що робити з відходами?» стоїть дуже гостро. Сучасні технології їх утилізації потребують усе нових і нових жорстких процесів утилізації, проте більшість із них також дають відходи, які не завжди легко утилізуються. Натомість усі процеси, що відбуваються у живій природі, є циклічними і добре збалансованими.

Перетворення речовини в екосистемах реалізується шляхом кругообігу – відходи одних процесів використовуються в інших біологічних процесах. Яскравим прикладом подібної збалансованості можуть бути біосферні цикли вуглецю, кисню, азоту та інших біогенних елементів. Надзвичайна збалансованість природних екосистем, високий рівень кореляції внутрішньоекосистемних біотичних процесів дають людині переконливий доказ їх ефективності, підказують шляхи запозичення у живої природи елементів і принципів, що стають основою для проектування обладнання та розроблення майбутніх екотехнологій. Технології, які побудовані за екологічними принципами і базуються на зведенні до мінімуму негативного впливу на довкілля, слід вважати екологічнобезпечними технологіями або екотехнологіями. У тих випадках, коли згаданих принципів дотримуються, а технологічний процес побудований на використанні тих чи інших живих організмів, доцільно вести мову про виникнення та існування напрямку в екології – біологічного очищення, а технології, що застосовуватимуться – екобіотехнології [2].

Біологічне очищення, як відомо, базується на здатності мікроорганізмів включати в схеми метаболізму найрізноманітніші хімічні сполуки – забрудники. Розкладання забрудників відбувається під дією ферментів, що виробляються мікроорганізмами в середовищі забрудників, які підлягають усуненню. До біологічного очищення газових викидів від вуглекислого газу можна віднести фотосинтез [1-2].

Фотосинтез – унікальний у фізико-хімічному відношенні процес, який збільшує вільну енергію біосфери за рахунок зовнішнього джерела – Сонця та забезпечує існування як рослин, так і усіх гетеротрофних організмів, у тому числі й людину. Зараз важко, а то і зовсім неможливо знайти будь-які природні явища, які не поєднані з фотосинтезом. Фотосинтез сприяє зменшенню вуглекислого газу. Рослини засвоюють із повітря діоксид карбону та будують з нього свою біомасу. Водорості, як і інші зелені рослини потребують вуглекислий газ, а також невелику кількість мінералів для приросту біомаси. На відміну від наземних рослин вони ростуть у 7-10 разів швидше та відповідно «нейтралізують» більше вуглекислого газу та володіють здатністю адаптуватися у край несприятливих умовах. Такі властивості мікроводоростей є об'єктивною умовою для впровадження таких технологічних процесів у практику з метою очищення промислових газових викидів від вуглекислого газу. Хімізм даного процесу зображається реакцією:



Основною умовою фотосинтезу є присутність молекул вуглекислого газу, продукту спалювання твердого, рідкого чи газоподібного палива. Проте у таких продуктах спалювання, завжди містяться й інші оксиди, зокрема діоксид сульфору. Присутність діоксид сульфору у продуктах спалювання, промислових газових викидах, зумовлена присутністю сполук сірки у природних покладах палива. За своєю будовою молекули SO₂ та CO₂ подібні, а тому, є припущення, що на етапі транспортування у внутрішній об'єм клітини мікроводорості, не завжди система їх розрізняє. Потрапивши у внутрішній об'єм клітини мікроводорості, на етапі фотосинтезу, молекули SO₂ блокують процес фотосинтезу. Відтак, існує необхідність дослідження процесу очищення промислових газових викидів за участі хлорофілсинтезуючих мікроводоростей в присутності SO₂, що адекватно вивченню впливу діоксиду сірки на процес фотосинтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що в літературі мало міститься матеріалів присвячених вивченню впливу діоксиду сірки на процеси поглинання вуглекислого газу, тому є важливим детальніше дослідити його вплив на фотосинтез хлорофілсинтезуючих мікроводоростей.

Мета роботи полягає у вивченні впливу діоксиду сірки на процеси фотосинтезу, що адекватно вивченню впливу SO₂ на приріст біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей.

Теоретична частина. У внутрішньому середовищі клітини мікроводоростей безперервно відбувається складний процес біохімічних перетворень, який називається фотосинтезом. У чіткій послідовності з великою швидкістю проходять численні біохімічні реакції. Швидкість реакцій та їхня послідовність визначаються наявністю специфічних ферментів – каталізаторів.

Механізм дії ферментів полягає у тому, що вони утворюють з речовиною-субстратом специфічний фермент-субстратний комплекс. Приєднання субстрату до ферменту відбувається у зоні каталітичного центру, який і сприяє перебігу біохімічної реакції. Внаслідок біохімічної еволюції каталітичний центр набуває такої структури та просторової конфігурації, яка дає змогу взаємодіяти лише з певною речовиною-субстратом [3-4].

Речовини, що здатні гальмувати ферментативні реакції, називають інгібіторами. В процесі вивчення впливу інгібіторів на ферментативні реакції була одержана інформація щодо субстратної специфічності ферментів, природи функціональних груп, що входять до складу активного центру ферментів, механізму дії ферментів та участі певних функціональних груп у підтримці специфічної конформації молекули ферменту. Інгібування різних ферментів специфічними клітинними компонентами є одним із факторів, що регулюють процес ферментативних реакцій у клітині. Таким клітинним компонентом на нашу думку виступає діоксид сірки, який проникаючи через клітинну мембрану у внутрішнє середовище клітини мікроводорості виконує роль інгібітора.

Інгібітори, які знижують активність ферментів за умови взаємодії з тими самими функціональними групами активних центрів, що й субстрати, називають конкурентними. Інгібітори, які знижують активність ферментів за умови взаємодії з іншими функціональними групами, називаються неконкурентними. Неконкурентне інгібування можна послабити або зовсім усунути підвищенням концентрації субстрату. На неконкурентне інгібування концентрація субстрату не впливає.

Конкурентне інгібування легше всього виявити, побудувавши графіки Лайнуівера – Берка, тобто графіки в координатах $1/v$ від $1/[S]$ за різних концентрацій інгібітора. Для дійсного конкурентного інгібування - це прямі лінії, що відрізняються між собою тангенсом кута нахилу та перетинають вісь ординат в одній точці (рис. 1 а). Наявність конкурентного інгібітора не змінює максимального значення швидкості реакції V_{max} . У присутності конкурентного інгібітора уявна величина константи Міхаеліса K_m більша, ніж її значення на величину, що дорівнює різниці в довжині відрізків, які відсікаються на осі абсцис.

За графіком Лайнуівера-Берка, побудованого для різних концентрацій інгібітора, можна зробити висновок про те, що неконкурентний інгібітор знижує значення V_{max} , тоді як величина K_m залишається сталою (рис. 1 б) [3].

Експериментальна частина. Об'єктом даних досліджень була культура зелених мікроводоростей – *Chlorella*. Її культивували протягом 12 діб у чотирьох ємкостях об'ємом $1,5 \text{ дм}^3$. Базове живильне середовище містило рівну кількість інокулянту із культурою мікроводоростей *Chlorella vulgaris*. Живильні речовини - вуглекислий газ та елементи мінерального живлення клітини водорості отримують безпосередньо з навколишнього рідкого середовища, засвоюючи їх всією своєю поверхнею. Для дослідження впливу інгібування у першу посудину було введено діоксиду сірки до концентрації $0,001 \text{ мг/мл}$, у другу – $0,002 \text{ мг/мл}$, у третю – $0,003 \text{ мг/мл}$, а у четверту – $0,004 \text{ мг/мл}$.

Приріст біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей, за таких умов визначали фотокolorиметричним методом з використанням синього світлофільтра згідно закону Бугера-Ламберта-Бера. Оскільки оптична густина пропорційна концентрації мікроводоростей, то одержані експериментальні дані накопичення біомаси мікроводоростей в залежності від часу в межах досліджуваної концентрації інгібітора (SO_2) відповідають значенням оптичних густин [7].

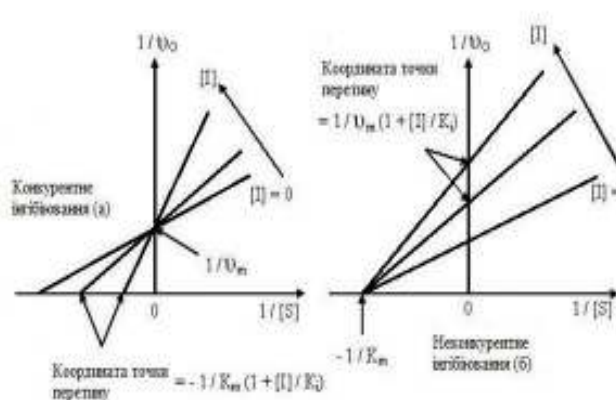


Рис. 1. Графік Лайнуівера – Берка для конкурентного (а) та неконкурентного (б) інгібування за літературними даними [3].

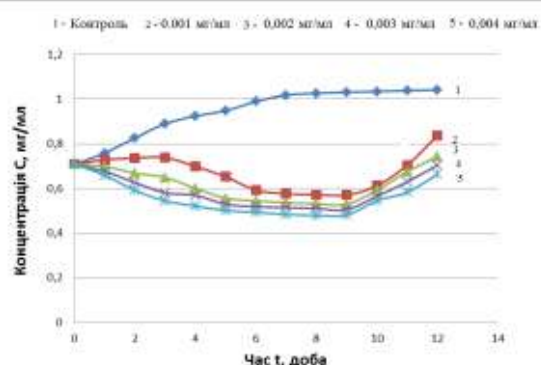


Рис. 2. Зміна концентрації клітин мікроводоростей в часі за відповідних значень концентрацій інгібітора.

На основі результатів експериментальних досліджень та розрахункових величин було отримано графічні залежності зміни концентрації мікроводоростей від часу за різних значень діоксиду сірки в розчині при

одноразовому введенні (рис. 2.). Аналізуючи дані (рис. 2.) слід зазначити, що концентрація клітин мікроводоростей суттєво залежить від вмісту інгібітора (SO_2) в порівнянні з контролем. Із зростанням концентрації інгібітора зменшується приріст маси мікроводоростей, водночас спостерігається збільшення маси клітин мікроводоростей в контрольній ємності, яка не зазнала впливу інгібітора.

Згідно отриманих експериментальних даних діоксид сірки суттєво впливає на кінетику приросту мікроводоростей, а тому слід припустити, що (SO_2) виступає в ролі інгібітора. Тому важливо було встановити інгібування є конкурентним чи неконкурентним. Для цього згідно отриманих експериментальних даних було побудовано графік Лайнуівера-Берка в координатах $1/S$ від $1/V$ (рис. 3).

Порівнюючи дані літератури теорії, графік Лайнуівера-Берка (рис. 1.) з експериментально одержаним графіком (рис. 3.) слід зауважити схожість отриманих прямих з прямими на (рис. 1. (б)), тому є підставою вважати, що має місце неконкурентне інгібування, тобто інгібітор приєднується до ферменту не в активному центрі, де зв'язується субстрат, а в іншому місці молекули. За таких умов конформація молекули ферменту змінюється таким чином, що відбувається зворотна інактивація його каталітичного центру. Неконкурентний інгібітор (SO_2) зв'язується зворотно, як з вільним ферментом, так і в фермент-субстратному комплексі, утворюючи неактивні комплекси.

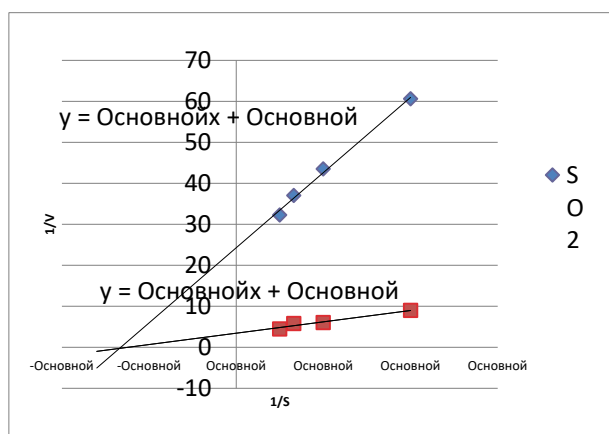


Рис. 3. Графік Лайнуівера-Берка для визначення типу інгібування SO_2 .

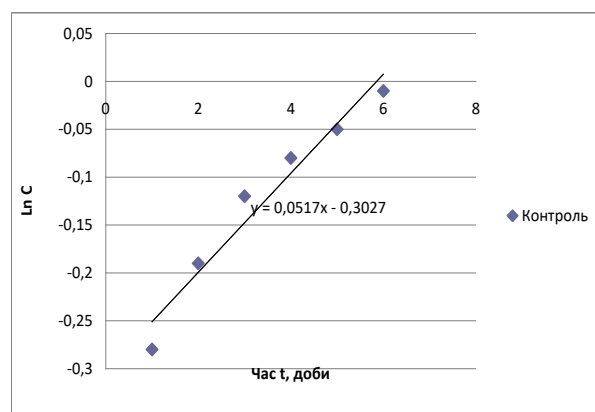


Рис. 4. Залежність зміни логарифму концентрації клітин мікроводоростей від часу.

За допомогою цього ж графіка (рис. 3), побудованого за різних значень концентрацій інгібітора (SO_2), визначаємо відрізок, що відсікає пряма від осі ординат та відповідає величині $1/V_{\max}$, а продовження прямої відсікає на осі абсцис відрізок, що рівний $-1/K_m$. Звідси обчислене значення K_m та $V_{\max}$ за умови присутності інгібітора (SO_2) становить $K_m = 0,16$ мг/мл, а $V_{\max} = 0,041$ мг/мл·доба, для контрольного дослідження визначено $K_m = 0,16$ мг/мл, а $V_{\max} = 0,29$ мг/мл·доба.

За таких обставин, слід припустити, що зміна чисельності клітин мікроводоростей за одиницю часу в умовах експерименту визначається кількістю народжених та відмерлих за цей час клітин:

$$\frac{dC}{dt} = (\gamma - \delta) C, \quad (1)$$

або

$$\frac{dC}{dt} = \mu C \quad (2)$$

де $\mu = (\gamma - \delta)$, γ - коефіцієнт розмноження; δ - коефіцієнт відмирання;

В момент часу $t = 0$ чисельність клітин мікроводоростей $C = C_0$. Розв'яжемо диференціальне рівняння проінтегрувавши обидві його частини:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t \mu dt, \quad (3)$$

звідки

$$C = C_0 e^{\mu t} \quad (4)$$

Дане рівняння в логарифмічних координатах дозволяє визначати коефіцієнт приросту $-\mu$.

$$\ln \frac{C}{C_0} = \mu t, \quad (5)$$

Аналізуючи експериментальні дані досліджень представлені на рис. 2, можемо стверджувати, що графічно розв'язок (4) представляється кривою 1:

Після підстановки експериментальних даних у рівняння (5) отримуємо графічну залежність (рис. 4), яка дозволяє визначати коефіцієнт приросту. Швидкість розмноження більше швидкості відмирання.

Тобто при концентрації інгібітора $x=0$, чисельність клітин мікроводоростей необмежено зростає з часом і коефіцієнт приросту становить $\mu = 0,0517$ доба⁻¹, (рис. 4).

Криві 2,3,4,5 на рис. 2 описуються рівняннями (6);

$$C = C_0 e^{-\mu t} \quad (6)$$

Швидкість відмирання клітин більша швидкості розмноження. Таким чином, при значенні концентрацій інгібітора $x=0,001$ мг/мл; 0,002 мг/мл; 0,003 мг/мл; 0,004 мг/мл чисельність особин з часом спадає, а коефіцієнти приросту є меншими нуля $\mu < 0$. Значення коефіцієнту приросту визначали при відповідних концентраціях інгібітора за допомогою графічної залежності (рис. 5).

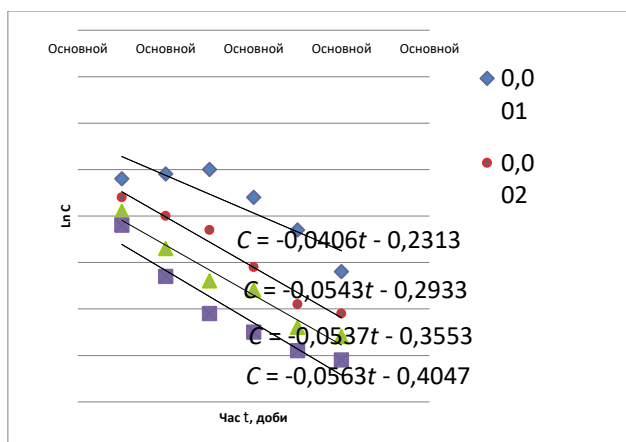


Рис. 5. Залежність зміни логарифму концентрації клітин від часу (при відповідних концентраціях інгібітора)

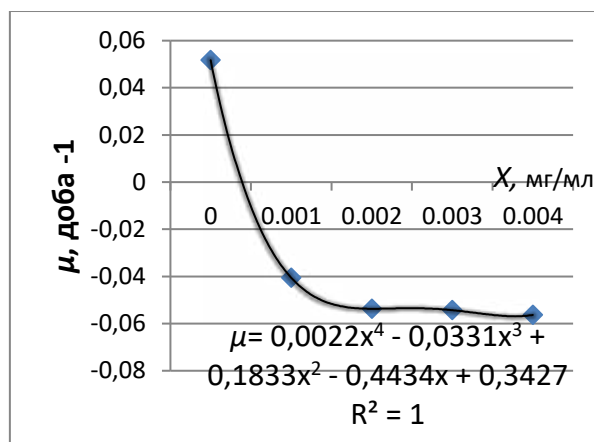


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнту приросту від концентрації інгібітора.

Нарешті має бути така концентрація інгібітора, за якої приріст є величиною постійною. Тобто $\mu = 0$. Значення цієї концентрації стане можливим визначити, якщо побудувати графічну залежність $\mu=f(x)$. Для цього використовуючи отримані результати обчислення коефіцієнту приросту за певних значень концентрацій інгібітора, та отримуємо криву, яка описується наступною аналітичною залежністю (7) рис. 6:

$$\mu = 0,0022x^4 - 0,0331x^3 + 0,1833x^2 - 0,4434x + 0,3427 \quad (7)$$

Рівняння (7) вирішували за допомогою комп'ютера та знаходили значення концентрації діоксиду сірки при якому $\mu = 0$. Це значення становить 0,00045 мг/мл. Це максимальна концентрація діоксиду сірки у середовищі культивування, при якому проходить процес фотосинтезу, тобто має місце поглинання CO_2 та постійний приріст біомаси мікроводоростей. За таких умов чисельність мікроводоростей не змінюється, залишається на початковому рівні. При менших значеннях концентрацій SO_2 розрахованого за рівнянням (7) можливий приріст біомаси мікроводоростей та відповідно інтенсивніше поглинання CO_2 . Зазначимо, що при цьому $\mu > 0$ і модель адекватна до реального процесу лише до певного значення часу.

Висновки. Вивчено вплив діоксиду сірки на процес поглинання вуглекислого газу хлорофілсинтезуючими мікроводоростями. Теоретично обґрунтовано на основі теорії Лайнуївера-Берка та експериментально доведено наявність неконкурентного інгібування діоксидом сірки процесу фотосинтезу хлорофілсинтезуючими мікроводоростями. Отримана аналітична залежність коефіцієнту приросту мікроводоростей від концентрації діоксиду сірки в середовищі культивування мікроводоростей. Встановлено співвідношення $CO_2 : SO_2$ за якого може проходити фотосинтез та приріст біомаси мікроводоростей. Розраховані значення допустимих концентрацій діоксиду сірки в середовищі культивування мікроводоростей підтверджено експериментально.

Література.

1. Дячок В. В. Вивчення впливу температури на кінетику поглинання вуглекислого газу мікроводоростями [Текст] / В. В. Дячок, С. І. Гуглич, О. Б. Левко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування.- 2015. - № 812. - С. 365-372.
2. Стеценко О. В. Біоорганічна хімія [Текст]/ О. В. Стеценко, Р. П. Виноградова. – К.: Вища школа. 1992. – 278 с.
3. Губський Ю. І. Біологічна хімія. [Текст] / Ю. І. Губський.- К.: Нова книга. 2007. – 137 с.
4. Золотарьова О.К. Перспективи використання мікроводоростей у біотехнології [Текст] / О.К. Золотарьова, Є.І. Шнюкова, О.О. Сиваш, Н.Ф. Михайленко. – К.: Альтерпрес, 2008. – 234 с.
5. Кисличенко В.С. Сировинні джерела продуктів біотехнології та їх аналіз : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. [Текст] / В.С. Кисличенко, І.О. Журавель, О.В. Бухаріна та ін. – Х. : НФаУ : Золоті сторінки. 2009. – 304 с.
6. Dyachok, V., The mechanism of extraction from solid bodies cellular structure [Text] / V. Dyachok, I. Ilkiv // Chemistry & chemical technology . - 2013. - Vol. 7, № 1. P. – 23-27.
7. Dyachok V. About the problem of biological processes complicated by mass transfer [Text]/ V. Dyachok, S. Huhlych, Y. Yatchyshyn, Y. Zaporochets, V. Katysheva// Chemistry & chemical technology.- 2017. - Vol. 11, №1. P. 111-116
8. Yang, Y. Effects of CO₂ concentrations on fresh water microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* (chlorophyta) [Text] / Y. Yang, K. Gao// Journal of applied Phycology. -2003.-N.00. - P. 1-11.
9. Stepan, D. J. 2.3 carbon dioxide sequestration using microalgae systems [Text] / D. J. Stepan, R. E. Shockey, T. A. Moe, R. I. Dorn // Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota. - 2002 - N.1.- P.1-27
10. Miyachi S. Historical perspective on microalgal and cyanobacterial acclimation to low- and extremely high-CO₂ conditions [Text] / S. Miyachi, I. Iwasaki, Y. Shiraiwa // Photosynthesis Research. - 2003. - N.77.- P. 139-153.

УДК 541.04

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА МОНТМОРИЛОНІТУ, МОДИФІКОВАНОГО ПОЛІОНЕНАМИ

Суша І.В., канд. техн. наук, доцент, Томіло В.І., канд. техн. наук, доцент,
Беляновська О.А., канд. техн. наук, доцент, Сухий К.М., д-р техн. наук, професор,
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро

TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF MONTHORYLONITE, MODIFIED POLYONENES

Sukha I.V., PhD, docent, Tomilo V.I., PhD, docent, Belyanovskaya E.A., PhD, docent,
Sukhyi K.M., SciD, professor,
State Higher Education Institution 'Ukrainian State University of Chemical
Engineering', Dnipro, Ukraine

***Анотація:** Розроблено технологію виробництва монтморилоніту, модифікованого полііоненами. Вивчено вплив технологічних параметрів на процеси модифікації монтморилоніту полімерними четвертинними амонійними солями. Показана кореляція між технологічними параметрами модифікації та складом, властивостями та структурою монтморилоніту. Визначено оптимальні параметри процесів модифікації монтморилоніту полііоненами. Показано, що процес інтеркаляції макромолекул полімерної четвертинної амонієвої солі у міжкристалічний простір монтморилоніту супроводжується збільшенням міжшарових відстаней з 1,08 нм до 1,67 нм. Розроблено методику синтезу модифікованого полііоненом монтморилоніту. Встановлено, що оптимальні умови сорбції молекул полііонену монтморилонітом спостерігаються при таких параметрах: концентрація водної дисперсії монтморилоніту – 1%; температура реакційного середовища 40°C; співвідношення монтморилоніт – полііонен 3:1; тривалість процесу – 24 год. За допомогою диференційно-термічного аналізу показано, що вміст полііонену в модифікованому монтморилоніті складає 12%. За допомогою ІЧ-спектроскопії показано,*

що щеплення органічних катіонів полііоненів на поверхні монтморилоніту є наслідком закріплення органічних катіонів на обмінних позиціях у процесі іонообмінної адсорбції і адсорбції силанольними групами кислого характеру (розірвані зв'язки на гранях кристалів) органічних катіонів. Встановлено, модифікація монтморилоніту полііоненами приводить до формування більш довшої структури шляхом адсорбції силанольними групами кислого характеру (розірвані зв'язки на гранях кристалів) органічних катіонів.

Abstract: The technology of obtaining of montmorillonite modified by polyionens is developed. The effect of technological parameters of montmorillonite modification processes by polymeric quaternary ammonium compounds is studied. Correlation between modification technological parameters and composition, properties and structure of montmorillonite is shown. Macromolecular polymer intercalation of a quaternary ammonium salt of montmorillonite intercrystalline space is shown to be accompanied with increased interlayer distances 1.08 nm to 1.67 nm. The technique of synthesis of modified montmorillonite by polyionens is designed. Optimal conditions sorption of polyionens molecules with montmorillonite are stated to be the concentration of aqueous dispersion of montmorillonite is 1%, the temperature of the reaction medium is 40 °C, the ratio montmorillonite-polyionene is 3:1, the processing time is 24 hours. Polyionene content is shown by DTA to be 12 % in modified montmorillonite. According to infrared spectral data, connection of polyionenes with montmorillonite surface is shown to result from attaching of organic cations on exchangeable positions during charge-transfer adsorption and adsorption of organic cations with acid silanol groups (neglected bonds on crystal faces). Montmorillonite modification is shown to result in formation of more perfect structure by adsorption of organic cations with acid silanol groups (neglected bonds on crystal faces).

Ключеві слова: модифікація, монтморилоніт, полііонен, ексfolіація.

Keywords: modification, montmorillonite, polyionens, exfoliation.

Глобальні світові тенденції протягом перших десятиріч XXI століття вимагають мініатюризації окремих елементів, що стимулює пошук альтернативних шляхів отримання нанодисперсних матеріалів [1], дизайн яких може бути здійснений тільки за участю кластерів молекул та нанорозмірних часток. Причому перехід від мікро- до нанотехнологій є, вочевидь, якісним, оскільки фізичні параметри, такі як температура плавлення, енергія зв'язку віднесена до одного атому, зміна міжатомних відстаней, іонна або електронна провідність, оптичні та магнітні властивості виявляють немонотонну залежність від розмірів [2,3]. Незалежно від методу модифікації глинистих мінералів, як показали автори [4], спрямоване регулювання колоїдно-хімічних властивостей дисперсних тіл та їх систем передбачає досконале вивчення будови дисперсних фаз, що включає визначення тонких особливостей їх структури, природи, величини й енергетичного стану поверхні; вивчення механізму формування структури і впливу різних факторів на їх структурно-адсорбційні характеристики; з'ясування механізму взаємодії колоїдної фази з визначеним дисперсійним середовищем; з'ясування механізму структуроутворення в дисперсійній системі внаслідок взаємодії часток між собою і з середовищем. Важливе значення для регулювання властивостей дисперсних систем має інтеркаляція іоногенних поверхнево-активних органічних сполук та полімерів у поруваті і шаруваті наноструктури з наступними пост-інтеркаляційними перетвореннями. Такими речовинами є полііонени, які містять в основному ланцюзі четвертинні атоми азоту. Взаємодія полііоненів та глинистих мінералів шаруватої будови викликає глибокі зміни їх хімічної будови, поверхні і пористої структури, і, отже, адсорбційної ємності мінералів по відношенню до вуглеводнів, різко зростає здатність до набрякання і тиксотропного гелеутворення органопохідних у дисперсійних середовищах різної полярності. Так, заміна обмінних катіонів глинистих мінералів органічними супроводжується розсушенням кристалічних решіток вздовж z-вісі й активацією їх внутрішньої поверхні [5], що сприяє утворенню сильно розвинутої мікропористої структури, яка доступна для адсорбції молекул різних вуглеводнів і інертних газів. Селективність сорбенту по відношенню до визначених речовин визначається діаметром пор, який залежить від розміру впровадженого катіона.

Поряд з цим спостерігається також зменшення енергетичної неоднорідності поверхні мінералу в результаті модифікації, що сприяє зростанню селективності. Це супроводжується істотними змінами гідрофільних властивостей поверхні дисперсних мінералів, а також різкому збільшенню спорідненості молекулярних властивостей поверхні стосовно органічних середовищ різної полярності, що підтверджується збільшенням адсорбції деяких вуглеводнів [5], поліпшенням змочування і диспергування, а також виділенням теплоти в результаті міжфазної сольватаційної взаємодії з молекулами розчинника. Отже, одержання полімерних композитів з використанням наноматеріалів вимагає створення певних енергетичних умов для поділу наночасток із наступним їх рівномірним розподілом за рахунок вибору відповідних оптимальних співвідношень між параметрами режимів роботи й конструктивним виконанням робочих елементів переробного устаткування.

Мета представленої роботи – розробка технології отримання монтморилонітів, модифікованих полііоненами. Для досягнення поставленої мети поставлені наступні задачі:

- вивчити вплив технологічних параметрів на процеси модифікації монтморилоніту полімерними четвертинними амонійними солями;
- визначити кореляції між технологічними параметрами модифікації та складом, властивостями та структурою монтморилоніту;
- визначити оптимальні параметри процесів модифікації монтморилоніту полііоненами.

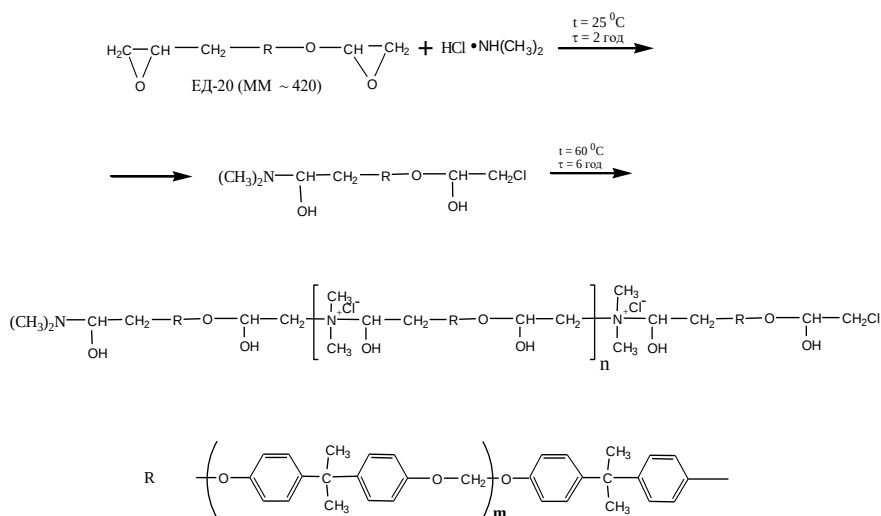
Експериментальна частина

У роботі вивчали монтморилоніт, отриманий з бентоніту марки БР (ТОВ "Дашуківські бентоніти", Черкаське родовище, Україна). Бентоніт – сірий порошок, вміст фракції монтморилоніту складає близько 85%.

Синтез полііонену на основі епоксидної діанової смоли ЕД-20 проводили за відомою методикою:

- при еквімолекулярному співвідношенні змішували 10 % розчин ЕД-20 в ізопропіловому спирті з 10 % розчином диметиламіногідрохлориду в ізопропіловому спирті. Реакційну суміш при постійному перемішуванні витримували при температурі 25 °С 2 години;
- синтезували полііонен за реакцією поліпрієднання з отриманого хлораміна. Реакційну суміш при постійному перемішуванні витримували при температурі 60 °С 6 годин.

Полііонен синтезували за наступною схемою:



Синтезований полііонен являв собою твердий осад біло-жовтого кольору. Для видалення залишків розчинника полііонен витримували в сушильній шафі при температурі 60 °С протягом 6 годин. Молекулярна маса полііонену, яка визначена титруванням кінцевих груп, складає 4500.

Модифікація поверхні ламенів монтморилоніту включає такі стадії: "відмулювання", активацію поверхні ламенів і модифікацію полііонену. "Відмулювання" проводили з метою виділення фракції монтморилоніту з бентоніту, активацію поверхні ламенів – з метою перетворення Ca²⁺-монтморилоніту в Na⁺-монтморилоніт шляхом заміни обмінних катіонів міжшарового простору монтморилоніту, так як катіонна активність Na⁺-монтморилоніт на порядок вища катіонної активності Ca²⁺-монтморилоніту і Mg²⁺-монтморилоніту, що забезпечить підвищену ефективність реакції обміну Na⁺ на N⁺(R₃). Модифікація монтморилоніту полііоненом полягала в заміні обмінного катіону Na⁺ на катіон полііонену.

Модифікований монтморилоніт синтезували за такою методикою:

- відмулювання монтморилонітової фракції;
- готували 1 % водну дисперсію бентоніту;
- дисперсію відстоювали 1 годину, відокремлювали суспензію монтморилоніту;
- виділяли осадок, висушували;
- готували 1% суспензію монтморилоніту, відстоювали 1 годину, зливали вискодисперсну фракцію;
- змішували з водою в співвідношенні 1:100, відстоювали 1 годину, зливали вискодисперсну фракцію, операцію відмулювання (виділення вискодисперсної (монтморилонітової) фракції бентоніта) повторювали 3-4 рази;

- активація проводилась шляхом додавання 5% водний розчин Na_2CO_3 до 1% водної дисперсії монтморилоніту та протягом 15 хвилин витримування при температурі 80-85 °С.

Отримання монтморилоніту з модифікованою поверхнею ламенів проводили за методикою: в 1% водну дисперсію активованого монтморилоніту при інтенсивному перемішуванні додавали 15 % водний розчин полііонену. Суміш при постійному перемішуванні витримували при температурі 40 °С протягом 24 годин при постійному перемішуванні. Тверду фазу відділяли на центрифугі і сушили в умовах вакууму при температурі 60 °С до постійної маси. Сухий залишок подрібнювали, просіювали через сито № 250 і додатково сушили в сушильній шафі при 80 °С.

Результати та їх обговорення

З метою знаходження оптимальних параметрів процесу модифікації монтморилоніту було вивчено вплив температури та співвідношення компонентів на кінетику процесу осадження полііонену на поверхні кристалічних шарів (ламенів).

На рис. 1 наведено кінетичні криві процесу осадження полііоненів при різних температурах. Як видно з наведених даних усі кінетичні криві мають S – подібний характер. Швидкість осадження полііоненів зростає при підвищенні температури, при температурі 40 °С досягає максимального значення (рис. 2).

Таким чином, в результаті проведених досліджень виявлено, що процес модифікації монтморилоніту синтезованою полімерною четвертичною амонієвою сіллю доцільно проводити при температурі 40 °С.

Також було вивчено вплив співвідношення монтморилоніту та полііонену в водній дисперсії на ефект модифікації – вміст полііонену в модифікованому монтморилоніті. Як видно з наведених даних співвідношення компонентів в реакційному середовищі суттєво впливає на швидкість процесу модифікації та його ефективність – кількість осадженого полііонену (рис. 3, 4). Згідно з наведеною на рис. 4 кореляційною залежністю між співвідношенням полііонен /монтморилоніт у водній дисперсії та співвідношенням полііонен/монтморилоніт у модифікованому монтморилоніті при вмісті полііонену 20% різко зростає кількість полііонену на поверхні ламенів монтморилоніту, що можна пояснити утворенням асоціатів при концентрації полііонену 20%.

Таким чином, оптимальним є режим модифікації монтморилоніту полііоненом при температурі 40 °С (рис.1, 2) тривалістю 24 години (рис.1), при співвідношенні монтморилоніт/ полііонену у водній дисперсії 3:1 (рис.3,4).

Ступінь впорядкованості структури монтморилоніту, періодичність у розташуванні кристалічних шарів (ламенів) монтморилоніту та відстань між кристалічними шарами монтморилоніту оцінені за допомогою рентгенівського розсіювання. На рис. 5 надано ширококутові рентгенограми дослідженого монтморилоніту. Немодифікований монтморилоніт має невеликий дифузійний пік в області $2\theta = 8,6^\circ$, що формально відповідає відстані між кристалічними шарами $d = 1,03$ нм. У випадку монтморилоніту, модифікованого полііоненом, відбувається зміщення піка в область малих кутів $2\theta = 5,8^\circ$.

Заміна міжшарових обмінних катіонів на полімерні катіони полііонену супроводжується збільшенням відстані між кристалічними шарами до 1,67 нм. При цьому змінюється не тільки положення ширококутового максимуму, але і форма цього максимуму (інтенсивність та напівширина), яка безпосередньо пов'язана зі ступенем досконалості макрорешітки (паракристалічною впорядкованістю). Збільшення міжплощинної відстані в монтморилоніті при модифікації полііоненом свідчить про впровадження фрагментів макромолекул модифікуючої добавки в міжшаровий простір монтморилоніту. Тобто відбувається заміна міжшарових металкатіонів на катіони полііонену, що призводить до послаблення дії міжшарового зв'язку.

Методом диференційно-термічного аналізу вивчені синтезовані органомонтморилоніти. Для термограм вихідного монтморилоніту характерен подвійний термічний ендоефект при 130 °С і 200 °С, які відповідають втраті адсорбованої води, і ендоефект при 540 °С, який пов'язаний з дегідроксиляцією мінералу (рис. 6).

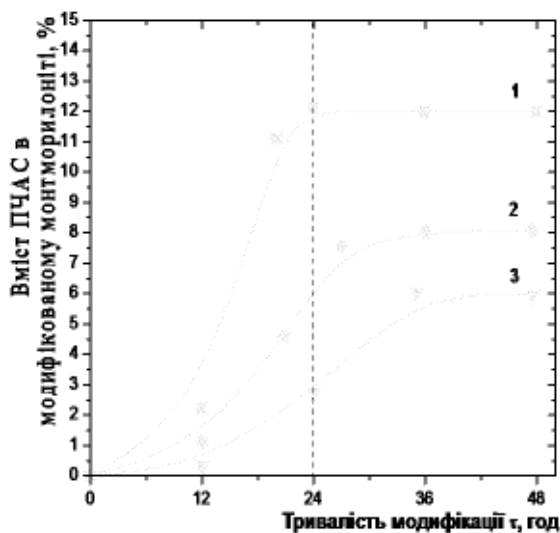


Рис. 1. Кінетичні криві процесу модифікації монтморилоніту (при співвідношенні монтморилоніт/ полііонен – 3:1) для різних температур (t , °C): 1 – 40,60; 2 – 30; 3 – 20

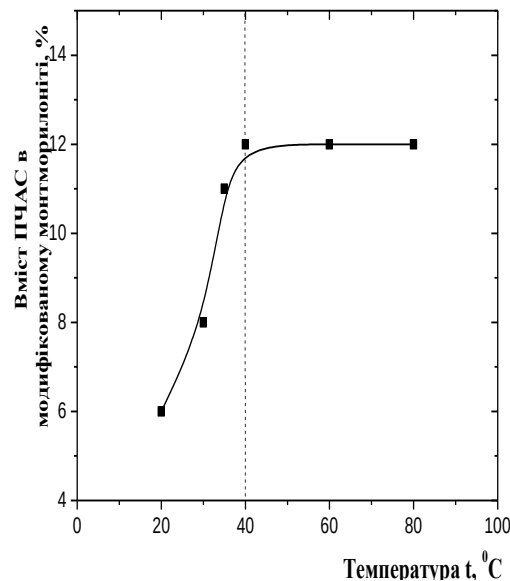


Рис. 2. Температурна залежність вмісту полііонену в модифікованому монтморилоніті ($\tau = 24$ год; співвідношення монтморилоніт/ полііонен 3:1)

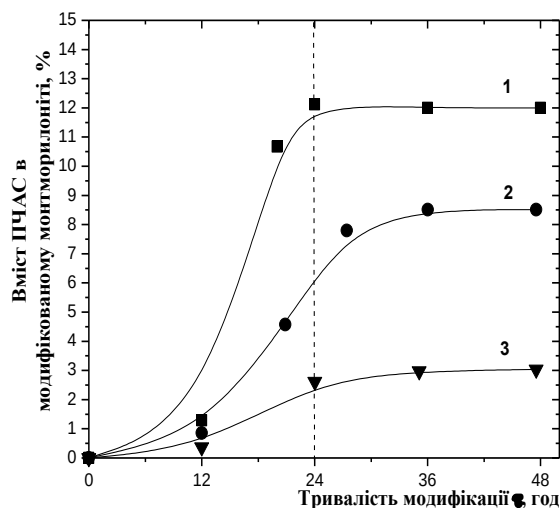


Рис. 3. Кінетичні криві процесу модифікації монтморилоніту ($t = 40$ °C) при різному співвідношенні монтморилоніт/ полііонен: 1 – 3:1; 2 - 5:1; 3 – 10:1

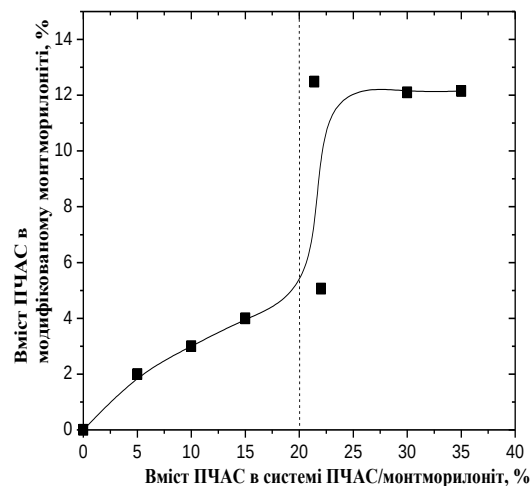


Рис. 4. Кореляційна залежність ($\tau = 24$ год; $t = 40$ °C) вмісту полііонену в модифікованому монтморилоніті від співвідношення монтморилоніт/ полііонен

На кривій модифікованого монтморилоніту при температурі 250 °C спостерігається екзотермічний пік, який відповідає розкладанню полііонену. З порівняння відповідних екзотерм, а також кривих втрати маси (рис. 7) визначено вміст полііонену в монтморилоніті, який складає 12%.

Для визначення стану адсорбенту й адсорбата були проведені ІЧ-спектроскопічні дослідження монтморилоніту, модифікованого полііоненом. При зіставленні спектрів вихідного й модифікованого монтморилоніту можна відзначити, що в спектрах модифікованого монтморилоніту з'являється ряд нових смуг, характерних для полііонену.

Так, дві смуги в спектрах модифікованого монтморилоніту при 2930 й 2850 cm^{-1} відповідають валентним коливанням зв'язку N-C. Нові смуги в області 1380 й 1480 cm^{-1} відповідають коливанням відповідно CH_2 і CH_3 -груп, пов'язаних із четвертинними атомами азоту. В області валентних коливань структурних гідроксильних груп (смуги 3690, 3670, 3620 cm^{-1}) змін не відбулося. Однак, цікава ситуація спостерігається в області валентних коливань Si-O.

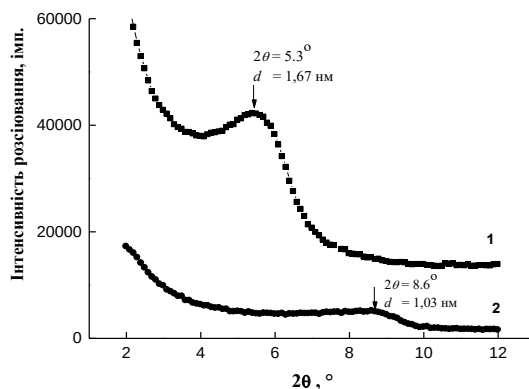


Рис. 5. Дифрактограми (ширококутове розсіювання рентгенівських променів) модифікованого полііононом монтморилоніту (1) та немодифікованого (2).

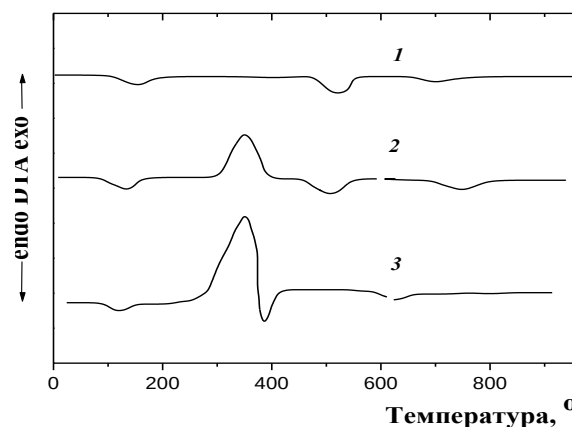


Рис. 6. Термограми монтморилоніту (1), модифікованого полііононом монтморилоніту (2) і полііонону (3).

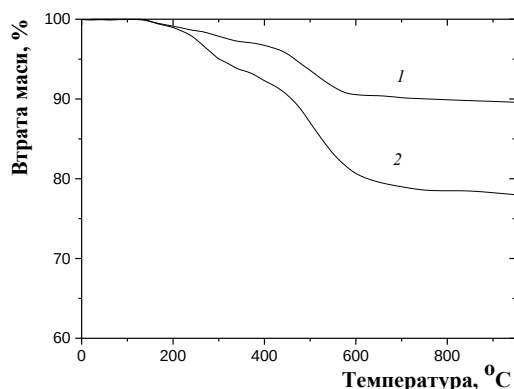


Рис. 7. Криві втрати маси монтморилоніту (1) і модифікованого полііононом монтморилоніту (2).

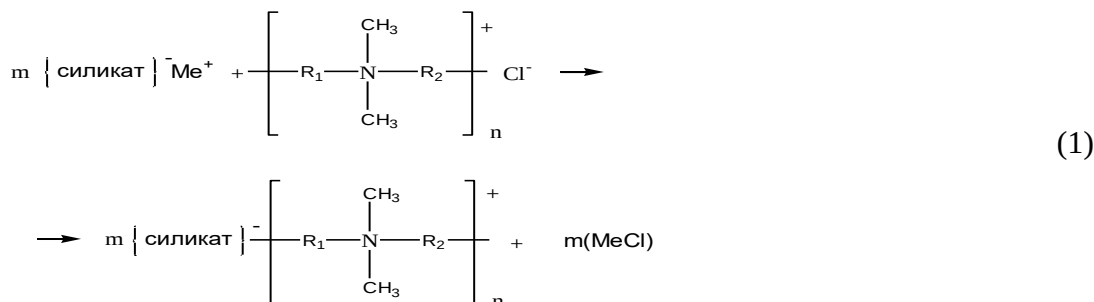
Смуга 1120 см^{-1} , що відповідає валентним коливанням Si-O з перпендикулярною зміною дипольного моменту щодо площини пакетів [6, 7], не перетерплює змін при переході від вихідного до модифікованого монтморилоніту, а смуга при 970 см^{-1} у вихідному монтморилоніті з переходом до модифікованого роздвоюється двома смугами 1030 й 1010 см^{-1} , які відповідають валентним коливанням зв'язку Si-O з паралельною зміною дипольного моменту щодо площини пакетів.

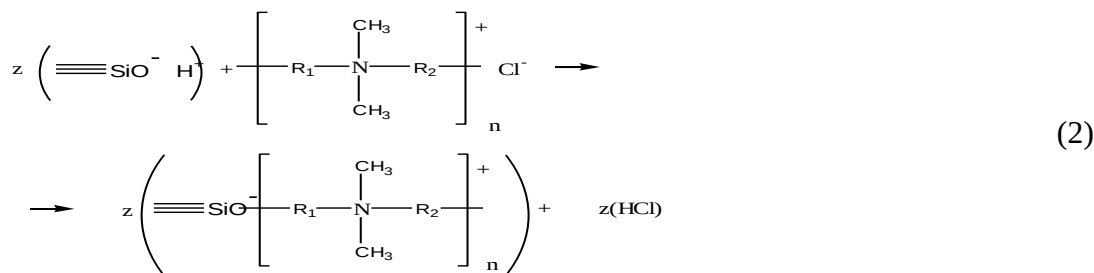
Оскільки октаедричні й тетраедричні шари монтморилоніту мають загальну сітку кисневих атомів [8], то природа катіонів безсумнівно впливає на положення смуг валентних Si-O-коливань. У роботах [6-8] відзначається, що зі збільшенням дефектності кристалічної структури монтморилоніту, що проявляється в наявності розірваних зв'язків на гранях кристалів і дефектів в октаедричних сітках, смуги Si-O-коливань з дипольною зміною паралельно площині

шарів стає більш дифузійною й зміщується у бік низьких частот. Тобто модифікація приводить до формування більш довершеної структури мінералів.

На підставі аналізу природи взаємодії амінів з поверхнею глинистих мінералів, автори [9] припустили, що при адсорбції амінів між кислотними OH-групами поверхні й атомами азоту амінів утворюється водневий зв'язок.

Зрозуміло, що було б й у нашому випадку припустити існування подібного роду взаємодій, однак, відомо [9], що четвертинний атом азоту не здатний до утворення водневого зв'язку через відсутність у нього неподіленої пари електронів.





У такому випадку, виявлена нами причина щеплення органічних катіонів полііоненів на поверхні монтморилоніту обумовлена закріпленням органічних катіонів на обмінних позиціях у процесі іонообмінної адсорбції (1) і адсорбції силанольними групами кислого характеру (розірвані зв'язки на гранях кристалів) органічних катіонів (2). Таким чином, можна припустити, що модифікація монтморилоніту полііоненами приводить до формування більш довершеної структури шляхом адсорбції силанольними групами кислого характеру (розірвані зв'язки на гранях кристалів) органічних катіонів (2):

Порівняння смуг 770 й 730 cm^{-1} для вихідного й модифікованого монтморилоніту також свідчить на користь даного висновку. Так, автори [9, 10] відносять ці смуги до деформаційних коливань гідроксильних груп решітки з дипольною поляризацією перпендикулярно площини шарів. Для модифікованого монтморилоніту ці смуги набагато меншої інтенсивності, чим для вихідного монтморилоніту й практично рівні по абсолютній інтенсивності. Це свідчить про те, що в модифікованому монтморилоніті більша частина гідроксильних груп решітки прореагувала за схемою (2).

Висновки

Згідно результатам дослідження впливу технологічних параметрів на процеси модифікації монтморилоніту полімерними четвертинними амонійними солями, встановлена кореляція між технологічними параметрами модифікації та складом, властивостями та структурою монтморилоніту. Визначено оптимальні параметри процесів модифікації монтморилоніту полііоненами: концентрація водної дисперсії монтморилоніту – 1%; температура реакційного середовища 40 $^{\circ}\text{C}$; співвідношення монтморилоніт – полііонен 3:1; тривалість процесу – 24 год. Вміст полііонену в монтморилоніті, синтезованому за запропонованою технологією дорівнює 12 %. Встановлено, що щеплення органічних катіонів полііоненів на поверхні монтморилоніту є наслідком закріплення органічних катіонів на обмінних позиціях у процесі іонообмінної адсорбції і адсорбції силанольними групами кислого характеру (розірвані зв'язки на гранях кристалів) органічних катіонів.

Список літератури

1. Wilde G. Nanostructured Materials. Elsevier, 384 p.
2. Nicolais L., Carotenuto G. Metal-Polymer Nanocomposites. John Wiley & Sons, 336 p.
3. Koo J. Polymer Nanocomposites : Processing, Characterization, And Applications: Processing, Characterization, And Applications. McGraw Hill Professional, 272 p.
4. Овчаренко Ф.Д., Вдовенко Н. В. Влияние природы поверхностно-активных веществ на свойства дисперсных минералов // Физико-химические основы применения поверхностно-активных веществ. – Ташкент: Фан, 1977. – С. 35–43.
5. Васильев Н. Г. Ионнообменные центры слоистых силикатов и их количественное определение / Васильев Н. Г., Головкин Л. В., Овчаренко Ф. Д. // Укр. хим. журн. – 1976. – Т. 42. – Вып. 11. – С. 1206–1208.
6. Тарасевич Ю. И., Радул Н. М., Овчаренко Ф. Д. Исследование адсорбции н-пропилового спирта на монтмориллоните методом инфракрасной спектроскопии // Колл. журн. – 1968. – Т. 30. – С. 137–143.
7. Тарасевич Ю. И., Овчаренко Ф. Д. Инфракрасные спектры каолинита // Колл. журн. – 1969. – Т. 31. – № 5. – С. 753–758.
8. Филимонов В. Н., Теренин А. Н. Проявление в инфракрасном спектре взаимодействия адсорбированных органических молекул с кислотными центрами поверхности силикагеля и алюмосиликагеля // Докл. АН СССР. Сер. Физ. химия. – 1956. – № 109. – С. 982–995.
9. Катионный обмен бентонита / Николов И.Х., Потапов Е.Э., Тугорский И. А., Младенов И.Т. // Химия и индустрия. – 1978. – №50. – 345с.
10. Synthesis, structure and mechanical properties of nanocomposites based on organoclay and polymeric matrix different nature / Burmistr M.V., Ovcharov V.I., Shilov V.V., Sukhyi K.M., Gomza Yu. P., Grischenko V.K., Ovcharenko V.G. // Technomer 03. 18. Fachtagung uber Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. – Chemnitz. – 2003. – Band 2. – P 65-71.

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА З РІДКИМ РЕАГЕНТОМ

Гумницький Я.М. д-р техн. наук, професор, Атаманюк В.М. д-р техн. наук,
професор, Симак Д.М. канд. техн. наук, Данилюк О.М. аспірант
Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів

STUDY OF THERMAL EXCHANGE PROCESSES AT THE TIME OF THE INTERACTION OF SOLID LIQUID LIQUID REAGENT

Gumnitsky Y.M., DSc., professor, Atamaniuk V.M., DSc., professor,
Symak D.M., PhD, Danyliuk O.M., graduate student
National University "Lviv Politechnika"

Анотація: Розглядається взаємодія твердого тіла з рідким реагентом, що супроводжується значним тепловим ефектом. Тепло хімічної взаємодії виділяється на поверхні розділу фаз і поширюється теплопровідністю у твердому тілі та конвективним теплообміном у рідині. Теоретично визначено температури поверхні твердого тіла, розподіл температур у рідині та твердому тілі, визначено характеристики потоків теплоти до твердої фази та до рідини. Встановлено аналогію між процесом масовіддачі та процесом тепловіддачі. В області значень концентрації нітратної кислоти визначено значення коефіцієнта масовіддачі для різних значень концентрацій. Проаналізовано вплив утворення бульбашок на пограничний дифузійний шар рідини. Досліджено, що зародження, ріст та відрив бульбашок газу від поверхні твердого тіла безпосередньо діє на пограничний дифузійний шар рідини, викликаючи його переміщення, а під час відриву бульбашок зумовлюючи його руйнування. Встановлено також, що відрив бульбашок від поверхні сприяє підведенню свіжого реагента з об'єму рідини замість рідини на поверхні частинки, концентрація якої наближається до нуля. Створено умови, за яких зростання концентрацій збільшує утворення бульбашок, що приводить до зростання коефіцієнта масовіддачі. Аналогічна картина спостерігалася під час кипіння рідини, коли збільшення пароутворення викликає зростання коефіцієнта тепловіддачі. Наведено математичну модель процесу тепло-масообміну під час цієї взаємодії. Основу моделі складає диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними початковими та граничними умовами. З метою представлення результатів розрахунків у безрозмірній формі введено параметр, що має розмірність температури. Визначено розподіл температур у твердому тілі та на поверхні взаємодії. Температура поверхні впливає на фізико-хімічні властивості системи у зоні взаємодії. Встановлено зв'язок між коефіцієнтами масовіддачі та тепловіддачі, що базується на спільній гідродинаміці. Співставлено розрахункові значення температур та експериментальні результати, які підтверджують теоретично визначені температури у зоні взаємодії твердого тіла з рідким реагентом.

Abstract: We consider the interaction of a solid with a liquid reagent, accompanied by a significant thermal effect. Heat released chemical interaction at the interface and applies heat conduction in a solid and in convective heat transfer fluid. Theoretically defined solid surface temperature, the temperature distribution in the liquid and solids, flow characteristics specified heat to the solid phase and the liquid. Established an analogy between the process masoviddachi and process heat. In the nitric acid concentration values defined masoviddachi coefficient for different values of concentration. The influence of the formation of bubbles in the boundary layer diffusion liquid. Investigated that the birth, growth and lead bubbles of gas from a solid surface acts directly on the boundary diffusion layer liquid, causing its movement, and during separation bubbles causing its destruction. It was also established that lead bubbles from the surface contributes to summing fresh reagent with the volume of fluid instead of liquid on the surface of the particles whose concentration is close to zero. The conditions in which concentrations of growth increases the formation of bubbles, leading to a growth factor masoviddachi. A similar pattern was observed in the boiling liquid, while increasing evaporation causes an increase in heat transfer coefficient. The mathematical model of heat and mass transfer during this interaction was presented. The basis of the model is a differential equation of thermal conductivity with appropriate initial and boundary conditions. In order to present the results of calculations in a dimensionless form was put option that has the dimension of temperature. The temperature distribution in a solid and on the surface of interaction was determined. The surface temperature affects the physical and chemical properties of the system in the area of interaction. The relationship based on a common hydrodynamics between the mass-transfer coefficient and heat-transfer coefficient was

determined. Temperatures are compared calculated values and experimental results confirming theoretical determined temperature zone of interaction of a solid body with liquid reagent.

Ключові слова: хімічна взаємодія, теплообмін, масообмін, температура поверхні.

Keywords: chemical interaction, heat-transfer, mass-transfer, temperature of the surface.

Вступ. Процеси тепло- та масообміну у системі тверде тіло – рідина широко використовуються у хімічних, харчових, гідрометалургійних, фармацевтичних та природоохоронних технологіях. До цих процесів належить розчинення, екстрагування з твердої фази, адсорбція, кристалізація, іонний обмін. Предметом розгляду є розчинення, яке, у свою чергу, поділяється на фізичне і хімічне, які можуть протікати у дифузійній, кінетичній чи змішаній області. Кожний процес розчинення супроводжується додатним або від'ємним тепловим ефектом. Теплота взаємодії виділяється на поверхні твердого тіла, де має максимальне значення. Відповідно усі фізико-хімічні параметри системи (густина, в'язкість, теплові та дифузійні параметри) значно відрізняються від ядра рідинного потоку. Тепло реакції з поверхні твердого тіла розповсюджується теплопровідністю у тверде тіло та конвекцією у рідинний розчин. Завдання полягає у теоретичному визначенні температури поверхні твердого тіла, розподілу температур у рідині та твердому тілі, визначенні потоків теплоти до твердої фази та до рідини. Робота відповідає науковому напрямку кафедр хімічної інженерії та екології і збалансованого природокористування.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. Процесу розчинення присвячено ряд публікацій як іноземних авторів [1], так і вітчизняних, у зв'язку з широким застосуванням методу. Теорія та практика цього процесу для ізотермічних умов достатньо добре опрацьована [2]. Ця теорія узгоджується із іншими масообмінними процесами, разом із цим володіючи рядом специфічних особливостей, наприклад, зникненням твердої фази у процесі розчинення, виділенням нерозчинних чи газоподібних продуктів, особливо під час хімічного розчинення [3]. Дифузійно контрольоване хімічне розчинення характеризується значними тепловими ефектами. Тепло виділяється на поверхні твердої фази і поширюється теплопровідністю у твердому тілі та конвекцією у рідинному середовищі. Створюються нестационарні процеси тепло- і масообміну. Врахування однакової гідродинаміки приводить до аналогій між цими двома процесами [4, 5]. Наявність інтенсивного перемішування [9] приводить до створення ефекту ізотропної турбулентності, яка носить локальний характер [6]. Даний метод рекомендований для теоретичного визначення коефіцієнта масовіддачі. Створення умов хімічного розчинення з виділенням газоподібних продуктів може бути здійснено методом вакуумування системи, коли умови на границі контакту фаз визначаються газовою або паровою фазами [7]. Теплові явища під час здійснення масообміну в системі рідина – тверде тіло визначаються законами теплових процесів, наведених у [8].

Теоретична частина.

Процеси розчинення твердого тіла, що протікають у дифузійній області, визначаються в основному законами молекулярної та конвективної дифузії. У той же час кожна взаємодія супроводжується певним тепловим ефектом, причому його значення можуть приймати додатні або від'ємні значення. У випадку незначних теплових ефектів виділенням теплоти можна знехтувати, а температуру оцінювати за середнім значенням. Разом з цим, у багатьох випадках цим ефектом знехтувати неможливо. Відзначимо особливості такого тепло-масообміну:

- ✓ джерело тепла знаходиться на поверхні взаємодії;
- ✓ потужність джерела тепла визначається тепловим ефектом та коефіцієнтом масовіддачі;
- ✓ масообмін нерозривно зв'язаний з теплообміном;
- ✓ теплота відводиться теплопровідністю у тверде тіло та конвекцією у розчин;
- ✓ у зоні взаємодії підтримується найвища температура, що впливає на фізико-хімічні властивості.

У першому наближенні можна прийняти, що коефіцієнт масовіддачі β змінює своє значення у залежності від температури T згідно з лінійним законом

$$\beta = \beta_0(1 + \sigma T_n), \quad (1)$$

де β_0 – коефіцієнт масовіддачі за початкової температури; σ – коефіцієнт пропорційності.

Кількість тепла Q , що виділяється на одиниці поверхні за одиницю часу, дорівнює

$$Q = \beta_0(1 + \sigma T_n) C_R Q_R, \quad (2)$$

де C_R – концентрація; Q_R – тепловий ефект взаємодії.

Схему розподілу температур у твердому тілі та у рідинному середовищі зображено на рис.1. Враховуючи поверхневу взаємодію, найвища температура спостерігається на поверхні сферичного твердого тіла, значно змінюючи усі фізико-хімічні характеристики, які використовуються під час

розрахункових визначень коефіцієнтів тепловіддачі та масовіддачі, а також коефіцієнтів дифузії. На рис. 1 позначено температури, пояснення яких наводиться у тексті.

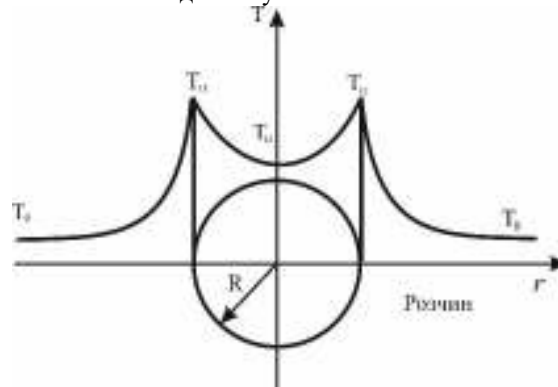


Рис. 1. Схема розподілу температур у твердому тілі та рідинному реагенті під час їх взаємодії, що супроводжується значним тепловим ефектом

Поширення тепла у твердому тілі для тіл сферичної форми визначається диференціальним рівнянням теплопровідності [8]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \tau > 0; \quad 0 < r < R \quad (3)$$

У залежності (3) T – температура; r – плинний радіус; R – радіус твердої частинки; a – коефіцієнт температуропровідності.

Гранична умова визначається розподілом тепла, що виділяється на поверхні (2), яке розподіляється між розчином та твердою частинкою

$$\beta_0 (1 + \sigma T_n) C_R Q_R = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_n + \alpha (T_n - T_1), \quad (4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла; α – коефіцієнт тепловіддачі; T_n , T_1 – температура поверхні твердого тіла та температура рідинного середовища.

Початкові умови для даного випадку взаємодії будуть рівні

$$T(r, \tau = 0) = T_0; \quad T_1(\tau) = T_0. \quad (5)$$

Введемо безрозмірні параметри:

$$\varphi = \frac{r}{R} \text{ – безрозмірний радіус; } Fo = \frac{a \tau}{R^2} \text{ – число Фур'є; } Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \text{ – число Біо;}$$

$$T^* = \frac{\beta_0 C_R Q_R R}{\lambda} \text{ – параметр, що має розмірність температури.}$$

Таким чином, задача формулюється у виді диференціального рівняння з граничними та початковими умовами, записана у безрозмірній формі

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \\ Bi(T_n - T_0) + \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=1} = T^* (1 + \sigma T_n), \\ T(\varphi, 0) = T_0; \quad T_1(Fo) = 0, \\ \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Задача (6) вирішувалась методом, оснований на перетворенні Лапласа. Рішення складається із нульового кореня та інших коренів характеристичного рівняння, яке для даного випадку, коли об'єм рідинної фази приймався великим, має вид

$$\operatorname{tg} \mu = -\frac{\mu}{\operatorname{Bi} - T^* \sigma - 1}. \quad (7)$$

Розподіл температур у твердому тілі на основі рішення задачі (6) має вид

$$\frac{T - T_0}{T^*(1 + \sigma T_0)} = \frac{1}{\operatorname{Bi} - T^* \sigma} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(1 - \operatorname{Bi} + T^* \sigma)}{[\mu_n^2 + (1 - \operatorname{Bi} + T^* \sigma)(T^* \sigma - \operatorname{Bi})]} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}}. \quad (8)$$

У випадку, коли коефіцієнт масовіддачі β змінюється незначно, рішення (8) спрощується і його можна записати наступним чином

$$\frac{T - T_0}{T^*} = \frac{1}{\operatorname{Bi}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\operatorname{Bi} - 1)}{[\mu_n^2 + \operatorname{Bi}(\operatorname{Bi} - 1)]} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}}. \quad (9)$$

Рішення (9) дозволяє теоретично визначити температуру у центрі кулястої частинки, що дозволяє експериментально перевірити теоретичне рішення та допущення незначної зміни коефіцієнта масовіддачі у рідинній фазі. У центрі кулі значення $\varphi = 0$, а

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} = 1,$$

тому рішення для $T = T_u$ буде рівним

$$\frac{T_u - T_0}{T^*} = \frac{1}{\operatorname{Bi}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\operatorname{Bi} - 1)}{[\mu_n^2 + \operatorname{Bi}(\operatorname{Bi} - 1)]} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}} \quad (10)$$

Експериментальна частина

Суть експерименту полягала у тому, що хімічному розчиненню підлягала частинка магнію в нітратній кислоті. Дана реакція лімітується не хімічною кінетикою, а належить до контрольованих дифузійно. Тепловий ефект цієї взаємодії складає 19385 кДж/кгMg, або 3740 кДж/кгHNO₃. Встановлено аналогію між процесом масовіддачі та процесом тепловіддачі. В області значень концентрації нітратної кислоти 5 – 60 кг/м³ нами визначалось значення коефіцієнта масовіддачі β для різних значень концентрацій. До особливостей цього процесу належить віднести наявність газової фази, що виділяється під час протікання реакції. Зародження, ріст та відрив бульбашок газу від поверхні твердого тіла безпосередньо діє на пограничний дифузійний шар рідини, викликаючи його переміщення, а під час відриву бульбашок здійснюючи його руйнування. Відрив бульбашок від поверхні сприяє підведенню свіжого реагента з об'єму рідини замість рідини на поверхні частинки, концентрація якої наближається до нуля. Створюється ситуація, за якої зростання концентрацій збільшує утворення бульбашок, що приводить до зростання коефіцієнта масовіддачі. Аналогічна картина спостерігається під час кипіння рідини, коли збільшення пароутворення викликає зростання коефіцієнта тепловіддачі.

Експерименти проводились на експериментальній установці у посуді, куди заливався розчин нітратної кислоти заданої концентрації і система термостатувалась до температури +20°C. Фіксувались температура поверхні частинки цифровим вольтметром і температура рідини скляним термометром. Великий об'єм розчину забезпечував незначне підвищення температури розчину. Коефіцієнт тепловіддачі визначався з рівняння тепловіддачі. Коефіцієнт масовіддачі визначався з рівняння масовіддачі. Втрата маси визначалась зважуванням частинки магнію через певні проміжки часу. Взаємозв'язок кінетичними коефіцієнтами масовіддачі β та тепловіддачі α встановлено на основі експериментів і відповідає залежності у границях $1 \cdot 10^{-4} < \beta < 4 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$

$$\alpha = 750 + 1,7 \cdot 10^7 \beta. \quad (11)$$

На рис. 2 наведено розрахункові (формула (10)) (суцільна лінія) та експериментальні заміри температури (точки) за допомогою термопар, встановленої у центрі частинки магнію для різних концентрацій нітратної кислоти. Задовільне співпадіння розрахункових та експериментальних значень температур свідчить про можливість використання теоретичного розрахунку температури та застосування

цих температур до визначення фізичних параметрів розчинення, що супроводжується значними тепловими ефектами.

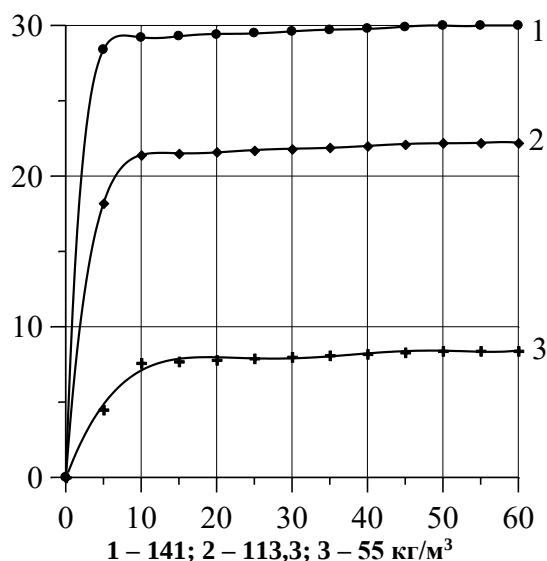


Рис.2. Співставлення розрахункових (суцільні лінії) та експериментальних значень температур центра кулі для концентрацій кислоти
1 – 141; 2 – 113,3; 3 – 55 кг/м³

Висновки

1. Розглянуто дифузійно контрольований процес розчинення твердих тіл, який супроводжується значним тепловим ефектом у зоні взаємодії, що змінює фізико-хімічні параметри рідини у зоні взаємодії.
2. Розроблено математичну модель нестационарного процесу теплообміну з поверхневим джерелом тепла, що дозволяє визначити температури у твердому тілі та рідинному середовищі.
3. Наведено аналогію теплообміну та масообміну, яка визначається однаковою гідродинамічною обстановкою у зоні реакції.
4. Співставлені розрахункові значення температур та експериментальні результати підтверджують теоретично визначені температури у зоні взаємодії.

Література

1. Hudzaifah Y. H., Nizamuddin N.M. Shaarani, Bawadi Abdullah, Md Abdus Salam, The Effect of Co-solvent on the Solubility of a Sparingly Soluble Crystal of Benzoic Acid, *Procedia Engineering*, Volume 148, 2016, P. 1320–1325.
2. Аксельруд Г.А. Растворение твердых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов // М.: Химия. – 1977. – С. 272.
3. Натареєв С.В. Массоперенос в системе с твердым телом / С.В. Натареєв, Н.Р. Кокина, О.С. Натареєв, Е.А. Дубкова // *ТОХТ*. – 2015. – т.49. – №1. – С. 74 – 78.
4. Маллик С. Теплоотдача при химическом кипении в условиях свободной конвекции / С. Маллик, Я.М. Гумницкий // *Инженерно-физический журнал*. – 1986. – т.50. – № 4. – С. 645–650.
5. Бабенко Ю.И. Влияние нестационарных эффектов на скорость растворения одиночной частицы / Ю.И. Бабенко, Е.В. Иванов // *ТОХТ*. – 2013. – т.47. – №6. – С. 624 – 629.
6. Symak D.M. Analysis of dissolution kinetics based on the lokal isotropic turbulence theory / D.M. Symak, V. M. Atamaniuk., Gumnitsky Ya. M. // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2015.– Vol. 9. – N4. – P. 493–497.
7. Гумницький Я.М. Розчинення твердих тіл у трифазній системі, утвореній вакуумуванням / Я.М. Гумницький, Д.М. Симак, О.А. Нагурський // *Наукові праці*. – Одеська національна академія харчових технологій. – В. 47. – Т.1. – 2015. – С. 130–132.
8. Гумницький Я.М., Петрушка І.М. // *Інженерна екологія*. – Ч. 2. – В-тво. Львівської політехніки. – 2016.– С. 348.
9. Charbel H. Enhancing heat transfer in vortex generator-type multifunctional heat exchangers / Charbel H., Serge R., Daniel B., Jean-Luc H.T., Lemenand D., Hassan P. // *Applied Thermal Engineering*. – V. 38. – 2012– P. 14-25.

АДСОРБЦІЙНО-ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ У СТАТИЧНОМУ ШАРІ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ В СТАЦІОНАРНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

Сабадаш В.В. канд. техн. наук, доцент Гумницький Я.М. д-р техн. наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ADSORPTION-DIFFUSION PROCESSES IN THE STATIC LAYER OF DISPERSION MATERIAL IN STATIONARY AND DYNAMIC CONDITIONS

V. V. Sabadash, J. M. Gumnitsky
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine

Анотація: Представлено результати експериментальних досліджень динаміки сорбції та іонообмінного поглинання іонів купруму цеолітом у апараті колонного типу. Було проаналізовано існуючий теоретичний апарат для опису процесів адсорбції. Досліджено механізм процесу адсорбції і розроблено методи для ідентифікації експериментальних даних теоретичним моделям. Експериментально досліджено сорбційну ємність цеоліту щодо іонів купруму в динамічних умовах. Побудовано вихідні криві динаміки адсорбції іонів купруму цеолітом в апараті колонного типу. Встановлено взаємозв'язок ступеня насичення сорбенту від критерію Фур'є. Отримані результати експериментальних досліджень дають змогу визначити коефіцієнти динаміки процесу адсорбції важких металів в апаратах колонного типу. Експериментально досліджено дифузію висококонцентрованих розчинів у шарі інертного зернистого середовища в статичних умовах. Встановлено залежність швидкості процесу від напрямку фронту дифузії та розраховано коефіцієнти дифузії, кінетичні коефіцієнти дифузійного процесу та швидкість фронту дифузії. Відповідно до експериментальних даних крім молекулярної дифузії має місце конвективний масоперенос та фільтрація матеріального потоку крізь шар насадки. Це залежить від концентрації іонів важких металів у вихідному розчині та від напрямку фронту дифузії. Було встановлено, що значення коефіцієнту дифузії іонів купруму по різні напрямки напрямі осі Z відрізняється на п'ять порядків, а при порівнянні коефіцієнтів дифузії компоненту у від'ємному напрямі осі Z (вниз) та у напрямі осі Y на порядок. Проведено узагальнення отриманих результатів дослідження та розрахункових даних.

Abstract: Copper and its compounds are widely used in many industries and there are many potential sources of copper pollution. Various methods have been used to remove heavy metals from wastewater, including: reduction and precipitation, coagulation and flotation, adsorption, ion exchange, membrane technologies and electrolysis. The results of experimental studies of the dynamic of ion exchange adsorption of copper ions by zeolite in the periodic conditions were presented. The existing theoretical apparatus for adsorption processes description was analysed. Adsorption process mechanism was investigated and methods for identification of experimental data to theoretical models were developed. Sorption capacity of zeolite to heavy metals in dynamic conditions was experimentally investigated. Adsorption capacity of adsorbents was set. The breakthrough curves of adsorption dynamics of copper ions by zeolite in the column-type apparatus were built. The interrelation the saturation degree of sorbent to Fourier number was discovered. The results of experimental studies make it possible to determine the adsorption process of heavy metals in the column-type apparatus. The results of experimental studies make it possible to determine the coefficients of dynamic of adsorption process. The migration of high concentration solutions in the soil environment is experimentally investigated. The dependence of speed of process on direction of front of diffusion was established and coefficients of diffusion, kinetic coefficients of diffusive process and speed of front of diffusion, were expected. According to experimental data in addition to molecular diffusion of material flow occurs convective mass transfer and filtration through the layer through the nozzle. It depends on the concentration of heavy metals' ions in the initial solution and the direction of the front diffusion. It was found that the value of diffusion coefficient of copper ions in different directions Z-axis direction differs by five orders of magnitude, and by comparing the diffusion coefficients component in the negative direction of the axis Z (down) and the Y-axis direction in order. Generalization of the obtained results and calculated data were carried out.

Ключові слова: важкі метали, купрум, динаміка адсорбції, коефіцієнт масовіддачі.

Keywords: heavy metals, copper, adsorption dynamic, the mass-transfer coefficient

Постановка проблеми і її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. Для розробки ефективних методів вилучення забруднень та цінних компонентів з промислових стоків, з метою розробки природоохоронних заходів, необхідно з'ясувати вплив різних факторів, зокрема гідродинаміки потоків на ефективність вилучення цінних компонентів з матеріального потоку [1,2]. Відомо, що протитечійні схеми реалізації масообмінних процесів ефективніші за прямотечійні. Процеси адсорбції включають поглинання компоненту в статичних та динамічних умовах [3]. Вивчення динаміки дозволяє встановити розподіл сорбованого компонента у рідинному середовищі та адсорбенті у просторі та часі. На основі динаміки сорбції визначається час досягнення явища «проскоку» [4]. Це необхідно для забезпечення ефективної роботи обладнання та забезпечення необхідного ступеня вилучення адсорбата з матеріального потоку. На процеси адсорбції в апаратах колонного типу крім сил міжмолекулярної взаємодії, гідродинаміки потоку та термодинамічних параметрів системи впливає дифузія адсорбату через міжфазну поверхню всередину сорбента, природа адсорбента і адсорбата, гравітація, в'язкість, поверхневий натяг та густина розчину [5]. Але для врахування вкладу цих чинників на динаміку адсорбції необхідно з'ясувати характер зміни концентрації у нерухомому шарі сорбента у статичних умовах.

Мета роботи – дослідити динаміку адсорбції іонів купруму в апараті колонного типу з нерухожим шаром сорбента та встановити закономірності розподілу концентрацій катіонів металів в шарі сорбента в залежності від напрямку подачі потоку в апарат та визначення коефіцієнту дифузії компоненту у дисперсній системі тверде тіло-рідина в стаціонарному режимі для оптимізації процесу адсорбції в апаратах колонного типу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У попередніх дослідженнях було вивчено адсорбційні властивості цеоліту Закарпатського родовища, основу якого складає клиноптилоліт, стосовно ряду сполук, зокрема Cu(II) [6].

З'ясовано, що ізотерма адсорбції має s-подібний вигляд і належить до ізотерми II типу. Встановлено, що після утворення мономолекулярного адсорбційного шару адсорбція продовжується і далі. Це приводить до появи димолекулярного шару. [5].

Досліджено динаміку сорбції α -оксіпропіонової кислоти цеолітом в апараті колонного типу. На підставі проведених досліджень та розрахунків математичної моделі побудовано теоретичну залежність концентрації α -оксіпропіонової кислоти у рідкій фазі в залежності від числа Fo. Обґрунтовано параметри адсорбційної колони.

Приведено дані про міграцію компонентів мінеральних добрив та важких металів в ґрунтовому середовищі при постійній концентрації компоненту на поверхні ґрунту [2,3]. Процес дифузії мінеральних добрив при постійній концентрації компоненту на поверхні ґрунту описували системою рівнянь [3]

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial \tau} = D\varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \\ C(0, \tau) = C_0 \\ \left(\frac{\partial C}{\partial Z} \right)_{Z \rightarrow 0} = 0 \\ C(Z, 0) = 0 \end{cases}$$

Рішенням даної системи було рівняння:

$$\frac{C}{C_n} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2D\varepsilon\sqrt{\tau}} \right) \quad (1)$$

Проте дослідження проводили за умови низьких початкових концентрацій розчиненого компоненту на поверхні ґрунту. Авторами встановлено, що таких умовах має місце процес молекулярної дифузії компоненту по профілю ґрунту, причому концентрація розчиненої речовини $C = f(\tau, Z)$ не залежить від напрямку дифузії.

Для дослідження механізму проникнення мінеральних речовин у шар сорбента розглядаємо наступну ситуацію. При наявності на поверхні шару сорбента компоненту у відносно великій кількості, особливо за умови малої його розчинності буде спостерігатися поступове його проходження через шар дисперсного матеріалу [2, 3]. При цьому концентрація компоненту на поверхні шару сорбента буде постійною і рівною концентрації насичення, тобто $C_n = C_s$. Але при попаданні в навколишнє середовище добре розчинних речовин необхідно дослідити механізм процесу для прогнозування масштабів дифузії забруднень у ґрунтах

Методика визначення. Адсорбцію компонента в динамічних умовах здійснювали в апараті колонного типу з висотою шару цеоліту 2, 5 та 7 см. Концентрація вихідного розчину становила 0,002 кг/дм³. Визначення концентрації іонів купруму проводили атомно-абсорбційним методом [5] за стандартними методиками.

Для експериментального дослідження розподілу іонів купруму та їх дифузії в статичних умовах у нерухомому шарі дисперсного матеріалу застосовували CuSO_4 . Для виключення впливу на процес іонного обміну та зведення до мінімуму впливу адсорбційних процесів, як наповнювач в колонному апараті застосовували SiO_2 . Для забезпечення постійної концентрації Cu^{2+} на поверхні шару сорбента у вимірювальні комірки вносили по 50 г солі. Таким чином, виходячи з розчинності CuSO_4 420.5 г/л, забезпечувалася постійна концентрація Cu^{2+} на поверхні шару сорбента. Для визначення концентрації Cu^{2+} відбирали проби з шару сорбента на віддалі $Z = 0, 5, 10, 15$ та 20 см від поверхні шару дисперсного матеріалу. Розподіл речовини відбувається у нерухомому шарі інертного матеріалу з пористістю $\varepsilon = 0,4$ а) від поверхні вимірювальної комірки в об'єм середовища у від'ємному напрямку осі Z ; б) вздовж горизонтальної площини комірки, тобто в напрямі осі X ; в) з дна комірки до поверхні, тобто в додатному напрямі осі Z . Пори середовища були заповнені водою.

Експериментальні дослідження динаміки адсорбції іонів Cu^{2+} в апараті колонного типу з нерухомим шаром сорбента. Дослідження процесу сорбції іонів купруму природним цеолітом в динамічних умовах проводились в апараті колонного типу. Розчин подавався зверху колонки, проходив через шар адсорбенту різної висоти та збирався у приймачі очищеної води. Проводились заміри об'єму рідини у часі та з певної порції рідини відбирались проби на визначення концентрації іонів купруму. З експериментальних даних видно, що умовах даного гідродинамічного режиму процесу адсорбції іонів купруму на цеоліті має місце змішано-дифузійний механізм адсорбції. При недостатній висоті шару сорбента навіть за умов витрати розчину 3 мл/хв спостерігається проскок незначних кількостей забрудника вже з перших хвилин експерименту. Тому мінімальна висота шару сорбента повинна становити не менше 5 см. за початкової концентрації іонів купруму $0,015 \text{ кг/м}^3$ побудована початкова крива адсорбції іонів купруму в динамічних умовах, що адсорбуються на фільтрувальному матеріалі з адсорбентом при $Z = 2, 5$ та 7 см (рис. 1).

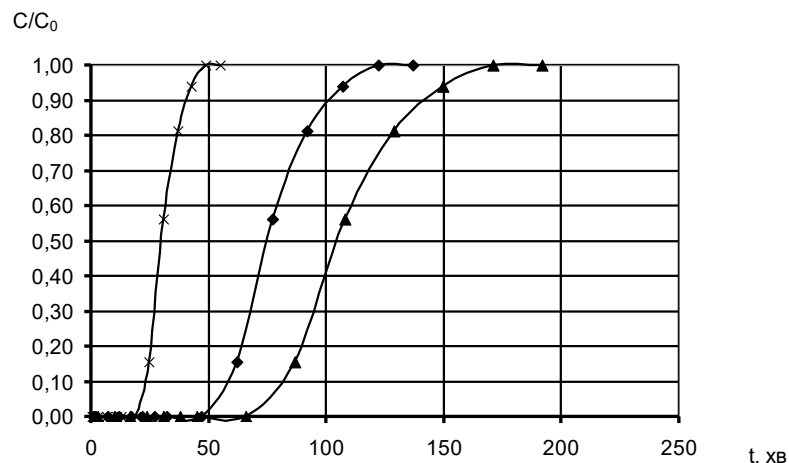


Рис. 1. Вихідна крива сорбції іонів купруму для різних висот шару сорбенту: x - 2 см; ♦ - 5 см; ▲ - 7 см

Математичний аналіз динаміки адсорбції базується на системі диференціальних рівнянь, розв'язок яких можливий лише за значних спрощень [3].

Для математичного вираження залежності між концентрацією іонів купруму та часом сорбції за певної швидкості пропускання розчину через колонку нами використано модель Томаса (2), яка є найбільш простою і зручною. Рівняння вихідної кривої для шару малої висоти описується наступним виразом:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - a e^{-\lambda F_0} \quad (2)$$

де λ - константа моделі, $1/\text{с}$;

a - коефіцієнт пропорційності;

$F_0 = D^*t/R^2$ - критерій Фур'є;

D^* - коефіцієнт внутрішньої дифузії іонів важких металів у зерні адсорбенту, $\text{м}^2/\text{с}$;

R - радіус зерна адсорбенту, м ;

t - час, С.

Значення величин $\frac{C}{C_0}$ для інших довжин шару Z одержується на основі перетворень Лапласа, згідно яких деяка функція N , що відповідає концентрації, змінюється згідно залежності, опублікованій у [3]:

$$\left(\frac{C}{C_0}\right)_n = 1 - \left[\lambda F_0 + \frac{(\lambda F_0)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda F_0)^{n-1}}{(n-1)!} \right] e^{-\lambda F_0} \quad (3)$$

де n – цілі довжини шару $n=2,3 \dots$

Модель пов'язує концентрацію на виході з колонки зі швидкістю пропускання розчину. У лінійну залежність об'ємна швидкість безпосередньо не входить, вона входить неявним чином у час сорбції, який дорівнює об'єму профільтованого розчину, поділеному на об'ємну швидкість. Модель застосовується для діапазону початкових концентрацій $(0,08-0,93) \cdot C_0$ і досить коректно описує процес мономолекулярної адсорбції, для якої справедлива ізотерма Ленгмюра та кінетика якої відповідає рівнянню другого порядку. Модель також передбачає, що процес сорбції контролюється масообмінними процесами між твердою та рідкою фазами. Кількість іонів купруму та хрому, яка затримана у колонці, відповідає площі під кривою проскоку у координатах $C-t$ і була розрахована чисельним інтегруванням.

Для визначення коефіцієнтів λ та a прологарифмуємо рівняння (1):

З метою представлення даних графічно, одержимо прямолінійну залежність:

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C_0}\right) = \ln(a) - \lambda F_0 \quad (4)$$

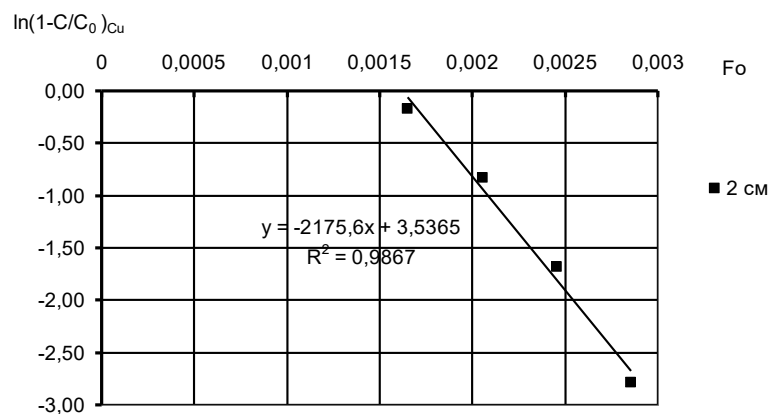


Рис. 2. Вихідна крива сорбції іонів купруму за $Z=2\text{см}$ в лінійних координатах $\ln(1-C/C_0)-f(F_0)$

З графіку визначаємо $\ln(a) = 3,5365$, $a=34,34$, $\lambda=2175,6$.

Рівняння (4) вихідної кривої для шару при адсорбції іонів купруму для висоти $Z=2\text{см}$ матиме вигляд:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - 34,34 e^{-2175,6 F_0} \quad (5)$$

Перехід до інших довжин шару адсорбента може бути виконаний на основі наближеного рішення (3).

Експериментальні дослідження дифузії важких металів у нерухомому шарі дисперсного матеріалу. Аналізуючи дані експериментальних досліджень за допомогою рішення математичної моделі одержано значення коефіцієнту дифузії Cu^{2+} у ґрунтовому середовищі по вертикальному профілю у від'ємному напрямку осі координат Z – $D=1,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис 3 а). Це свідчить про міграцію компоненту в ґрунтовому середовищі за механізмом турбулентного масопереносу. Швидкість руху фронту дифузії в даному експерименту становила $2,72 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ Cu^{2+} . Розподіл концентрації Cu^{2+} через шар дисперсного матеріалу вздовж горизонтальної площини комірки в напрямі осі Y (рис 3 б). при $t=\text{const}$ рис.. проходить також за механізмом турбулентної дифузії, що свідчить про значення коефіцієнту дифузії – $D=2,27 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Швидкість руху фронту дифузії в даному експерименті становила $6 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$. Це пояснюється тим, що розчин, який дифундує в порах ґрунтового середовища є суттєво важчий за воду, а $\Delta Z=5\text{см}$ і на швидкість

переміщення фронту дифузії має вплив сила гравітації. При $\Delta Z \rightarrow 0$ процес дифузії буде проходити за механізмом молекулярної дифузії, а коефіцієнт дифузії D буде порядку $\cdot 10^{-9}$ м²/с (рис 3 в)[3].

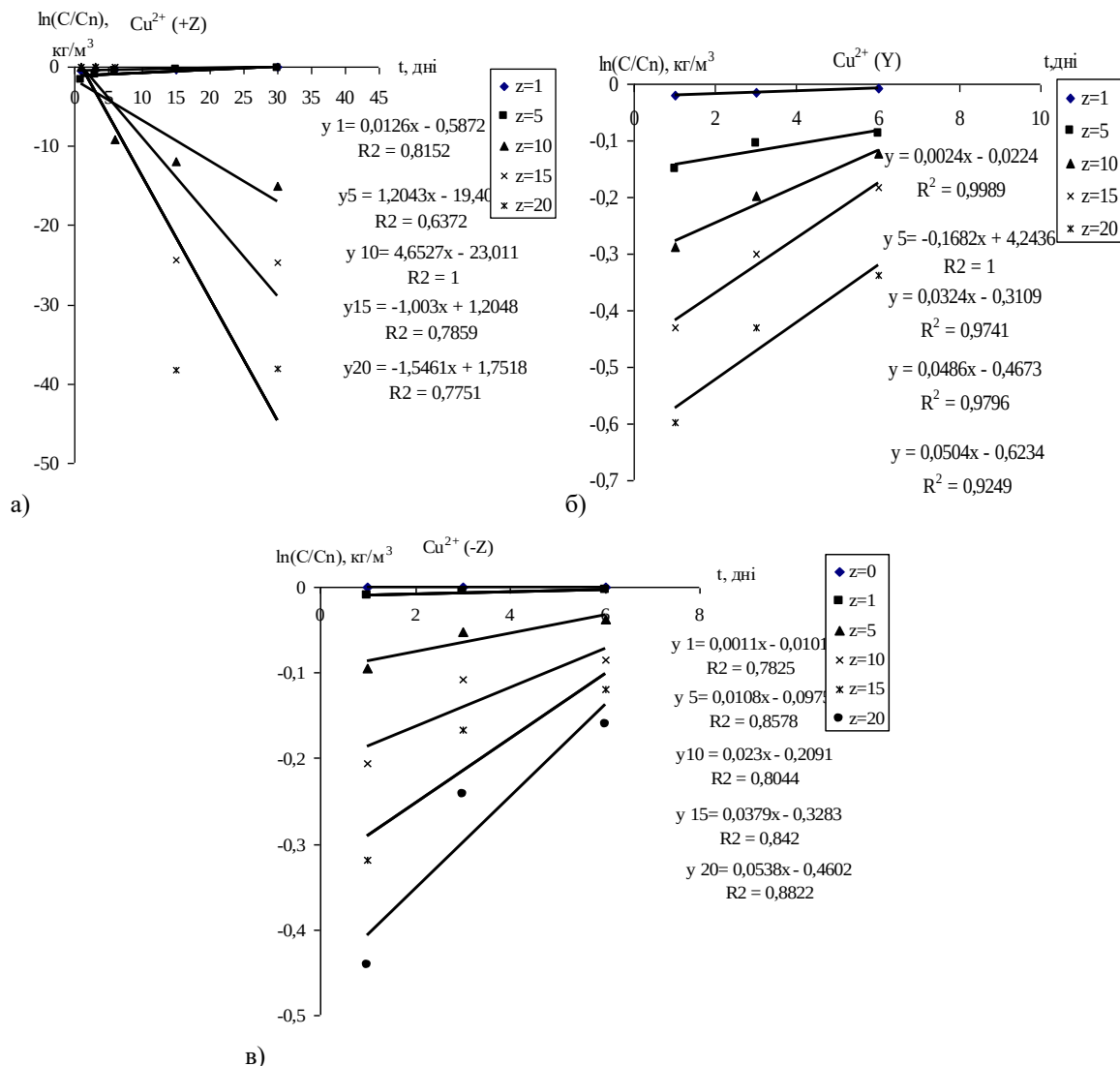


Рис. 3. Експериментальне визначення кінетичного коефіцієнту дифузії Cu^{2+} відносно профілю шару сорбента: а)- у від'ємному напрямку осі координат Z б) вздовж горизонтальної площини комірки в напрямі осі Y в)- у додатному напрямку осі координат Z

Це свідчить про міграцію компоненту в ґрунтовому середовищі за механізмом турбулентного масопереносу. Швидкість руху фронту дифузії в даному експерименту становила $2,72 \cdot 10^{-5}$ м/с Cu^{2+} . Розподіл концентрації Cu^{2+} через шар дисперсного матеріалу вздовж горизонтальної площини комірки в напрямі осі Y (рис 3 б). при $t = \text{const}$ рис.. проходить також за механізмом турбулентної дифузії, що свідчить про значення коефіцієнту дифузії – $D = 2,27 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Швидкість руху фронту дифузії в даному експерименті становила $6 \cdot 10^{-6}$ м/с. Це пояснюється тим, що розчин, який дифундує в порах ґрунтового середовища є суттєво важчий за воду, а $\Delta Z = 5$ см і на швидкість переміщення фронту дифузії має вплив сила гравітації. При $\Delta Z \rightarrow 0$ процес дифузії буде проходити за механізмом молекулярної дифузії, а коефіцієнт дифузії D буде порядку $\cdot 10^{-9}$ м²/с (рис 3 в)[3].

Результати дослідження процесу дифузії компоненту вверх по ґрунтовому профілю свідчать проте, що тут має місце молекулярна дифузія розчиненого компоненту в ґрунтовому середовищі, хоча процес сповільнюється також і силою гравітації та гідростатичним тиском рідини в порах ґрунтового середовища. Коефіцієнт дифузії Cu^{2+} у ґрунтовому середовищі по вертикальному профілю у додатному напрямку осі координат Z (рис 4. в) $D = 1,3 \cdot 10^{-11}$ м²/с.

Таблиця 1 – Визначення кінетичного коефіцієнту дифузії Cu^{2+} через шар дисперсного матеріалу

$K=k\omega/Z$	$z=1$	$z=5$	$z=10$	$z=15$	$z=20$
Дифузія в додатному напрямі осі Z	0,1380653	0,0827386	0,2277179	0,1379309	0,1804991
Дифузія у від'ємному напрямі осі Z	0,0088769	0,0664998	0,1221981	0,1791226	0,2458882
Дифузія в додатному напрямі осі Y	0,0041306	0,0392544	0,084295	0,1281034	0,1740219

Порівнюючи експериментальні та теоретичні дані та враховуючи значення достовірності апроксимації $R^2 \approx 1$ можна свідчити про задовільну збіжність результатів.

Висновок. Досліджено динаміку адсорбції іонів купруму цеолітом в апараті колонного типу в залежності від висоти шару сорбента. Побудовано вихідні криві динаміки адсорбції іонів купруму цеолітом в апараті колонного типу. Встановлено взаємозв'язок ступеня насичення сорбенту від критерію Фур'є. Для оцінки впливу способу реалізації процесу проведено дослідження дифузії іонів купруму в нерухомому шарі інертного матеріалу в статичних умовах за умови постійної концентрації досліджуваного компонента. Було встановлено, що значення коефіцієнту дифузії добре розчинного компонента, розраховане за теоретичними задлежностями, по різні напрямки осі Z, тобто у вертикальному напрямі відрізняється на п'ять порядків, а при порівнянні коефіцієнтів дифузії компонента у від'ємному напрямі осі Z (вниз) та у напрямі осі Y на порядок.

Література

- Kuliyeva, T. Z. Natural zeolite — clinoptilolite identification [Текст] / T. Z. Kuliyeva, N. N Lebedeva, V. I. Orbuh, Ch. A. Sultanov //Fizika. — 2009. — №3. — Р. 43–45
- Сабадаш, В.В. Експериментальне визначення кінетичних коефіцієнтів міграції мінеральних речовин за профілем ґрунту/ В.В. Сабадаш, Я.М. Гумницький, Л.О. Венгер //Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування №667.–2010.– С. 299–303.
- Гумницький Я.М., Сабадаш В.В., Венгер Л.О. Дослідження міграції мінеральних речовин у ґрунтовому середовищі за постійної концентрації /Я.М. Гумницький, В.В. Сабадаш, Л.О. Венгер //Вісник НУ “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування № 644. – 2009 р.– С.192–195.
- Гивлюд А.М. Проблема очищення стічних вод молокопереробних підприємств/А.М. Гивлюд, В.В. Сабадаш, Я.М. Гумницький // Наукові праці ОНАХТ. – 2016. – Т.80, № 1. – С. 126–131
- Фролов Ю.Г. Курс колоїдної хімії. Поверхневі явища і дисперсні системи. – К.: Вища школа – 1988. – 464 с.
- Сидорчук О. В. Сорбція іонів купруму із водних розчинів природним клиноптилолітом / О. В. Сидорчук, Я. М. Гумницький // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2013. – № 7. – С. 235–241

УДК 66.021.3.086:[66.061.3-035.2:615.451.1]

ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА НЕЕНЕРГОЄМНИХ КОНЦЕНТРАТІВ ФІТОПРЕПАРАТІВ

**Бурдо А.К., к.т.н., доц., Альхурі Юсеф, аспірант,
Ананійчук Е.Ю., інженер, Велічко В.П., магістрант
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса**

PROCESSES OF MANUFACTURE OF NON-ENERGY CONDENSED PHYTOPREPARATIVE CONCENTRATES

**Burdo A.K., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Alhuri Yusef, Postgraduate Student,
Ananiychuk E.Yu., engineer, Velichko V.P., masters
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa**

Анотація. Обговорено перспективи фітопрепаратів, їх концентрати із рослинної сировини. Аналізуються традиційні технології та способи переробки плодів шипшини, пектинових розчинів. Показано, що недоліками відомих технологій є громіздкість обладнання та низька ефективність використання енергії. Зроблено висновок про необхідність удосконалення цих технологій. В першу чергу

необхідні нові підходи до проведення процесів тепломасоперенесення. В роботі розглядаються проблеми сучасних технологій концентрування розчинів, випарних апаратів. Представлено концепцію доцільності використання адресної доставки енергії до елементів рослинної сировини для здійснення зневоднення розчинів. На основі такої концепції формулюється наукова гіпотеза, суть якої полягає в переході від класичної теплопередачі до принципів об'ємного підведення енергії. Пропонується здійснювати обробку сировини за допомогою електромагнітних генераторів енергії мікрохвильового діапазону. Розглянуто схему експериментальної установки та методику проведення дослідів. В основі установки вакуумний мікрохвильовий апарат. Передбачається автоматизований збір даних та комп'ютерна обробка результатів, візуалізація термограм, поточних значень вилучення вологи та паропроодуктивності на екрані дисплея. Представлено залежності цих параметрів від часу. Досліди проведено на екстрактах: із плодів шипшини, вичавок яблук та кісточок винограду. Проведено порівняння кінетичних залежностей. Зроблено аналіз результатів експериментальних досліджень та їх цінність для переведення технологій фітопрепаратів на нові принципи енергетичної дії.

Abstract: The prospects of phytopreparations, their concentrates from plant raw materials were discussed. The traditional technologies and methods of processing of wild rose, pectin solutions are analyzed. It is shown that the drawbacks of known technologies are the cumbersome equipment and low energy efficiency. The conclusion is made on the need to improve these technologies. First and foremost, new approaches to heat and mass transfer processes are needed. The paper considers the problems of modern technologies of concentration of solutions, evaporators. The concept of expediency of the use of targeted energy delivery to elements of plant raw material for dehydration of solutions is presented. On the basis of such a concept, a scientific hypothesis is formulated, the essence of which is the transition from classical heat transfer to the principles of volumetric energy supply. It is proposed to process raw materials using electromagnetic energy generators of the microwave range. The scheme of the experimental installation and the method of carrying out experiments are considered. At the base of the installation is a vacuum microwave oven. Automated data collection and computer processing of results, thermogram visualization, current values of moisture removal and vapor recovery on the display screen are foreseen. The dependencies of these parameters on time are presented. The experiments were carried out on extracts: from hipster, vinegars of apples and grape seeds. A comparison of kinetic dependencies was made. The analysis of the results of experimental researches and their value for transfer of technologies of phytopreparations to new principles of energy action is made.

Ключові слова: фітопрепарати, випаровування, екстракти рослинної сировини, енергоефективність, мікрохвильовий вакуумний випарний апарат.

Key words: Phytopreparations, evaporation, extracts of plant material, energy efficiency, microwave vacuum evaporator.

Вступ. У сучасній медицині лікарські засоби, вироблені із сировини рослинного і тваринного походження, становлять 25%. У терапії серцево - судинних захворювань частка таких препаратів доходить до 70% [1]. Останнім часом зросла роль лікарських рослин в парфюмерії та косметології. Жирні масла з рослинної сировини використовуються в харчовій промисловості, касторове масло використовується в авіаційній промисловості. Розширюється номенклатура рослинних препаратів, вдосконалюється методика аналізу і технологія виробництва [2]. Тому вивчення та удосконалення технологій вироблення фітопрепаратів наразі є дуже актуальним для освоєння потенціалу природи. Ключовим процесом в технологіях фітопрепаратів є концентрування екстрактів та соків. В роботі досліджуються процеси концентрування екстрактів із плодів шипшини, з вичавок яблук та виноградних кісточок.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Технологія комплексної переробки плодів шипшини на вітамінні препарати була розроблена Шнайдманом Л.О. [3] і складалася з наступних технологічних ліній: отримання концентрату з вітаміном С, отримання концентрату з вітаміном групи Р та отримання каротиноїдних препаратів (каротиноїдний пігмент у вигляді пасти або, якщо екстракцію пігменту ведуть рослинним маслом - каротолін). Ця технологія приваблива тим, що в досить повній мірі використовує ресурс вихідної сировини з випуском широкого кола готових продуктів. Технологія реалізується в екстракторах Гузенко, фільтрпресі, в трьохступеневому випарному апараті, в розпилювальній та вакуум-вальцьовій сушарці.

В останні роки приділяється значна увага з'ясуванню структури пектинових речовин у зв'язку з їх цінними технічними властивостями і високою фізіологічною активністю. Спектр їх біологічної дії широкий: пектини мають імуномодуючу дію, здатні виводити з організму важкі метали, біогенні токсини, анаболіки, ксенобіотики, продукти метаболізму і біологічно шкідливі речовини, які здатні накопичуватися в організмі (холестерин, ліпіди, жовчні кислоти, сечовину). Різноманітність властивостей пектинів, що володіють новими фізико-хімічними та фізіологічними властивостями, може бути досягнуто за рахунок хімічної модифікації: етерифікації, амідування. Пектин декларується як харчова добавка Е440.

Він широко використовується в харчовій промисловості як стабілізатор консистенції, згущувача, сполучного агента в джемах, молочних, кисломолочних і інших продуктах. Але традиційне обладнання для концентрування характеризується громіздкістю та енергоємністю [3].

Формулювання проблеми та наукової гіпотези.

Серйозною проблемою при виробництві концентрованих фітопрепаратів є енергоефективне обладнання для зневоднення. Наразі в теплотехнологіях випаровування є серйозні протиріччя. Традиційне апарати для випарювання засновані на контактному підводі енергії. Із ростом концентрації підвищується в'язкість розчину, більшим стає товщина приграничного шару у поверхні нагріву, росте термічний опір процесу теплопередачі. В результаті - утворюється пригар на стінках апарату, з'являється присмак варки. А це знижує можливості використання концентрату фітопрепаратів в харчовій промисловості і медицині.

В останні роки росте інтерес до технологій термічної обробки сировини в електромагнітному полі. Одним із способів такої технології є екстрагування в мікрохвильовому полі (МХП) [4]. Тривалість процесу з підводом мікрохвильової енергії суттєво зменшується, знижується мікробіологічне забруднення продукту [5, 6]. Але, апарати для концентрування розчинів в МХП тільки з'являються, їх застосування в технологіях фітопрепаратів не відомо.

Пропонується гіпотеза, що ефективним принципом зневоднення із розчинів має стати принцип об'ємного підведення енергії за допомогою МХП, використання джерел енергії електромагнітних генераторів, які спроможні на адресну доставку енергії безпосередньо до вологи. А це дасть змогу вирішення протиріч, що виникають при традиційній теплопередачі. Гіпотезу підтверджено результатами експериментальних дослідів.

Результати дослідження та їх обговорення

Об'єкти та діапазони досліджень наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Діапазон експериментального моделювання процесу випарювання

Водні екстракти	Тиск, кПа	Температура, T , °C	Кінцева концентрація, %
шипшини	5	40	50
вичавок яблук	12	70	54,3
кісточок винограду	7	55	80

Дослідження проводились на експериментальному стенді (рис. 1), який складається з герметичної камери (1), мікрохвильової камери (2), вакуум насоса (4), конденсатора (5), збірника конденсату (6), вагів (7) та холодильної машини (8).

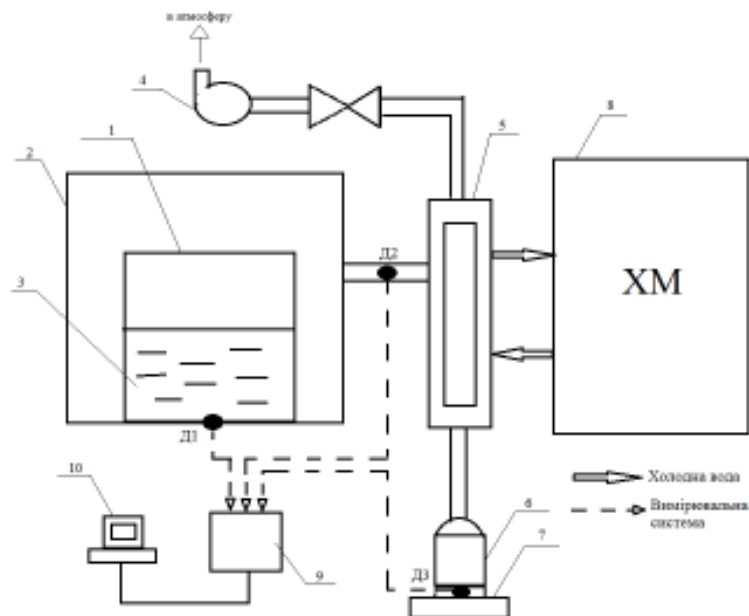


Рис. 1. Експериментальний стенд мікрохвильової випарної установки

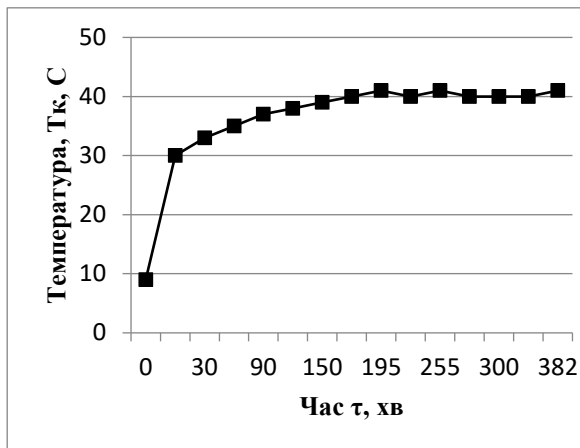


Рис.2 – Термограми процесу випарювання.

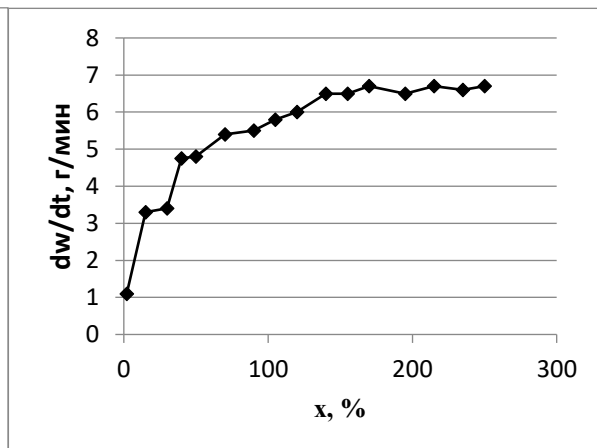


Рис.3 – Паропроодуктивність при випарюванні

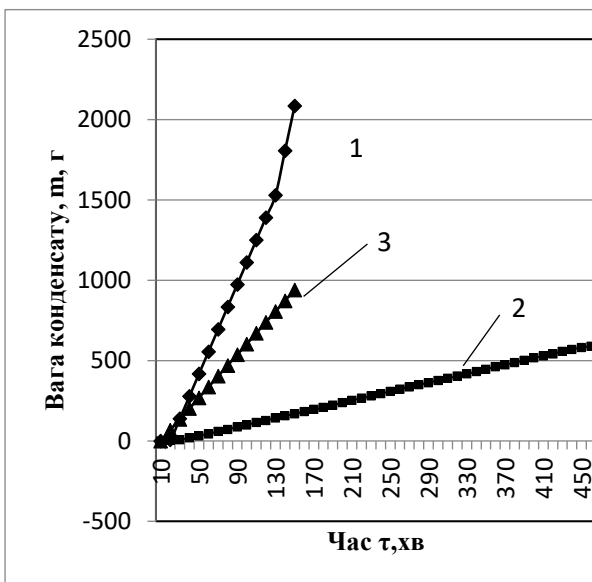


Рис.4. Зміна маси конденсату

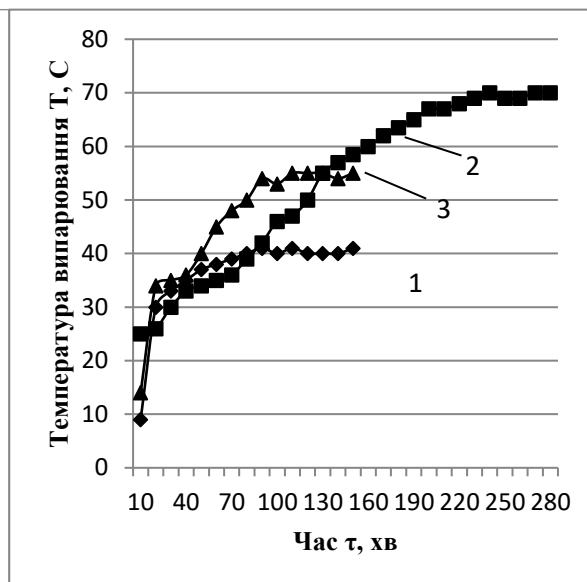


Рис.5. Термограми процесів випарювання

Екстракт 3 заливався в герметичну камеру 1, в якій здійснювалось випарювання. Температури поверхні камери 1 та пари на вході в конденсатор 5 контролювались за допомогою датчиків типа Dallas DS 18B20. Дані з датчиків температур і ваг ТВЕ-0,21-0,01 обробляються в контролері 9 і надходять на планшет CHUWI CW1506 10. Розроблено програму яка реалізує візуалізацію процесу, а також збереження в базі поточних даних.

Методика проведення дослідів наступна. Після заповнення камери екстрактом проводилось вакуумування системи та включався насос подачі холодної води із холодильної машини до конденсатору. Включалась необхідна потужність магнетрону й система автоматичної реєстрації температур та ваги конденсату. За рахунок енергії мікрохвиль, що впливають на полярні молекули води (тим самим приводячи їх до коливання) збільшується температура екстракту. При досягненні температури кипіння утворюється пара, яка конденсується та збирається в ємності 6. Поточна вага конденсату (яка дорівнює витратам вторинної пари із камери 1) вимірюється пристроєм 7 та передається на планшет 10.

На екрані планшету відображаються термограми та кінетика пароутворення (яка визначається по масі конденсату). Проводиться обробка даних та визначається паропроодуктивність (вихід пари в одиницю часу) та поточна концентрація екстракту.

Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 2 – 5.

В досліді фіксувалось тривалість процесу, температура и концентрація розчину в час обробки.

Випарювання екстракту із плодів шипшини з початковою концентрацією розчину 4,5 % проводилось при тиску 5 кПа і при температурі в камері 40 °С (рис.2). Об'єм екстракту в камері складав 1300 мл. Зміни ключового параметру процесу – паропродуктивності наведено на рис.3.

Паропродуктивність розраховувалась як відношення поточної маси конденсату (що реєструвалась за допомогою ваг) до відповідного відрізка часу.

У відповідності до табл.1 проводились експерименти із іншими екстрактами. Отримано якісно подібні залежності, але зафіксовано кількісні відмінності. На рис. 4 наведено порівняння первинних даних експериментів – зміни маси конденсату за часом. Отримані результати дозволяють зробити висновки, що найбільший вихід конденсату спостерігається при зневодненні екстрактів шипшини (рис.4). Процес випаровування екстракту шипшини йде при найнижчих температурах (рис.5). Повільний вихід пари характерне для екстракту із вичавок яблук. Пояснюється цей факт тим, що в цьому екстракті значна концентрація пектинових речовин, що обумовлює стає підвищення в'язкості розчину. Тому процес випаровування йде при більших температурах, а вихід пари найменший (рис.4, 5).

На рис.6 приведено порівняння основного параметру – паропродуктивності.

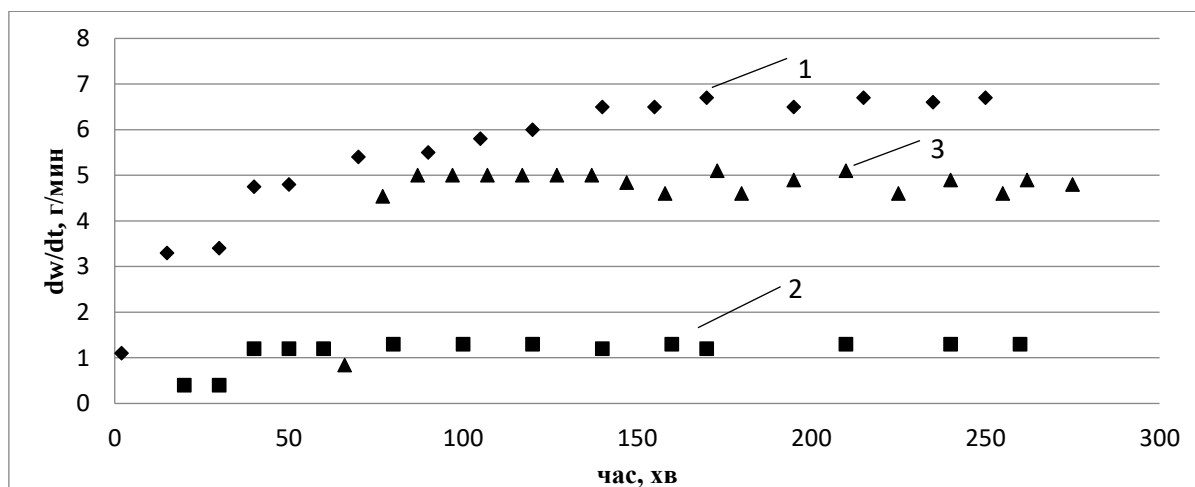


Рис.6. Паропродуктивність апарата з МХП

На рис.4 – 6 позначено екстракти так: 1 – із плодів шипшини, 2 – із яблучних вичавок, 3- із винограду кісточок.

Початковий об'єм профільтрованого екстракту із яблучних вичавок складав 700 мл. Процес випарювання проводили при температурі в камері 70 °С (рис.5). За період досліду випарувалось 590 мл конденсату (рис.5). Після випарювання отримано екстракт - густа коричнева маса, консистенцією нагадує згущене молоко, при підвищенні температури стає все більш текучим, має властивість желювання. Екстракт пектину, упарений до достатньої густоти.

Висновки. Отримані результати свідчать, що на базі МХП доцільна розробка технології концентрування рослинної сировини. Процес випаровування йде при сталій паропродуктивності. Можна очікувати мінімізацію часу проведення процесу і енерговитрат. Концентрати після МХП випарювання є безпечний в харчовому відношенні за мікробіологічними та фізико-хімічними показниками. Розроблена технологія є доступною для підприємств харчової і переробної промисловості, і легко впроваджується вже в існуючі технологічні лінії виробництва продуктів харчування та фітопрепаратів.

Література

1. Неумывакин И.П. Шиповник на страже здоровья /И.П. Неумывакин //Литера,2008.-С.1283.
2. Николайчук Л.В. Целебные деревья и кустарники /Л.В. Николайчук, Н.М. Матусевич, Р.П. Желясков // Современное слово, 2002. С.224.
3. Білобородов В.В. Витяг біологічно активних речовин з пряноароматичних сировини в системі процесів екстрагування-віджимання / В.В. Білобородов, В.Н. Брик, А.В. Прокоф'єв // Масложирова промисловість. - 1995. - № 3-4. - С. 24-27.10
4. Бурдо О.Г., Бурдо А.К., Альхури Юсеф, Сиротюк І.В. Массоперенос при экстрагировании из лечебного растительного сырья в электромагнитном поле. //ОНАХТ, Наукові праці, 2016, випуск 1, Т.80 – Одеса, ст. 59 - 67.

5. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
6. Бурдо О.Г. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях /Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.// Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2015г. – №1 (27) – С.79–85.

УДК 616.44-008.6-018-053-092.9

РОЛЬ НАДЛИШКОВОГО МАРГАНЦЮ В ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ МАНГАНІТУ І СТАБІЛІЗОВАНОГО ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ

Акимов Г.Я. канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,

Новохацька А.О. мол. наук. співроб.

Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, м. Київ

Коваленко Л.Л., канд.хім.наук, ст. наук. співроб.,

Інститут загальної та неорганічної хімії ім.В.І. Вернадського НАН України, м.
Київ

THE ROLE OF EXCESS MANGANESE IN THE FORMATION OF THE PROPERTIES OF A NANOSTRUCTURED COMPOSITE BASED ON MANGANITE AND STABILIZED ZIRCONIA

Akimov G.Ya. Cand. of phys.-math. scien., Senior Researcher,

Novokhatska A. Junior Researcher

Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O.Galkin of NASU, Kyiv

Kovalenko L.L., Cand. of chem. scien., Senior Researcher

Vernadsky Institute of general and inorganic chemistry of NASU, Kyiv

Анотація : В роботі представлені результати дослідження фазових складів, мікроструктури та електропровідності керамічних зразків 10 мол.% Sc+1 мол.% CeSZ (електроліту) - $(\text{Nd}_{0,67}\text{Sr}_{0,33})_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ (катод) композитів в залежності від вмісту надлишкового марганцю ($x=0; 0,2$). Порошки катоду і електроліту змішувалися у рівних пропорціях, скомпактовані у таблетки спікалися при температурі 1000 °C протягом 3 год. у повітрі. Вивчення рентгенівських даних і СЕМ зображень керамічних зразків показало, що введення надлишкового марганцю до катодного матеріалу призводить до збереження фазового складу і рівномірному росту зерна обох матеріалів композиту. Встановлено, що в зразку з $x=0,2$ реалізується перша стадія спікання, що підтверджується ущільненням зразка, коли зразок з $x=0$ залишається порошковим тілом. Така поведінка позначилася на електропровідних властивостях зразків. Знайдено, що зразок з надлишком марганцю має електропровідність в два рази більше, ніж в зразку без надлишку марганцю в усьому діапазоні температур. Крім того енергія активації провідності для зразка з $x=0,2$ складає 0,38 eV, що майже в два рази менше, ніж при $x=0$ (0,52 eV). Це пов'язано з тим, що велика кількість марганцю знаходиться на поверхні сприяє спіканню і формуванню границі зерен, що призводить до зменшення енергетичного бар'єру для носіїв заряду.

Abstract: We present the results of a study of the phase compositions, microstructures and electroconductivity of ceramic samples of 10 mol.% Sc+1 mol.% CeSZ (electrolyte)- $(\text{Nd}_{0,67}\text{Sr}_{0,33})_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ (cathode) composites depending on the content of excess manganese ($x=0; 0,2$). The powders of cathode and electrolyte materials were mixed in equal proportions, compacted to the billets and sintered at 1000 °C for 3 hours in the air. The study of the X-ray data and SEM images of ceramic samples showed that the introduction of excess manganese in cathode material leads to preservation of phase compositions and uniform grain growth for both materials of composite. It's found that in a sample with $x=0.2$ the first stage of sintering was realized which is confirmed by sample shrinkage when the sample with $x=0$ was remained a powder body. This behavior has affected the electroconductive properties of the samples. It's found that the sample with excess manganese has a electroconductivity twice more than the sample without excess manganese in all temperature range. Moreover the activation energy of conductivity for sample with $x=0.2$ is 0.38 eV which is almost two times less than for $x=0$

(0.52 eV). This is due to the fact that the excess manganese located on the surface promotes a sintering and forming of grain boundary that leads to reduction in the energy barrier for charge carriers.

Ключові слова: керамічна паливна комірка, катодні матеріали, наноструктурний, композит, електропровідність

Key words: ceramic fuel cell, cathode materials, nanoscale, composite, electroconductivity

Керамічна паливна комірка (КПК) вбачається поки що найперспективнішим як з огляду на свої досягнення, наприклад, паливна комірка, розроблена Дослідницьким Центром Юліх, Німеччина, вже може працювати більше 40 тисяч годин, використовуючи водень при температурі 700 ° С, так і свою порівняно високу невибагливість до палива, бо з однаковим успіхом споживає і неочищений водень, і вуглеводні, і чадний газ, і сірководень, і аміак тощо. Притаманна цьому типові паливних комірок порівняно висока робоча температура (вища за 600 ° С) надає йому можливість забезпечити найвищу ефективність перетворення хімічної енергії в електричну без використання коштовних матеріалів. Втім, звичайно, КПК, як і всі їхні типи, поки що є доволі дорогими пристроями, які потребують не тільки здешевлення, а й вдосконалення. КПК увійшли в стадію своєї структурної оптимізації, оптимізації будови пристрою, який здійснює паливно-комірчанний ефект – ефект прямого перетворення хімічної енергії в електричну і теплову, як цілісного матеріалознавчого об'єкту, який виконує одночасно різні завдання.

Керамічна паливна комірка є шаруватим макрокомпозитом, шари якого всі є різними, вони мають різну товщину і виконують різні завдання. До складу традиційної КПК входять: електроліт із діоксиду цирконію, стабілізованого у кубічній фазі; анод, який виготовляють із суміші порошків діоксиду цирконію і NiO, та катод на основі перовскитної манганітової кераміки, до якої часто додають діоксид цирконію для узгодження коефіцієнтів термічного розширення з електролітом. Хімічний склад електролітного матеріалу, а саме його стабілізація і наявність певних домішок, визначають рівень його іонної провідності [1]. Саме іонна провідність електроліту обумовлює корисну дію (ККД) всієї комірки. За даними [2] з цієї точки зору найбільш дієвим є електроліт на основі двооксиду цирконію, стабілізованого оксидами скандію та церію (SCZ), який має високу іону провідність порівняно з іншими стабілізаторами. Тому однією з необхідних вимог до складових компонент КПК є їхня хімічна стабільність за умов виготовлення і роботи комірки. Виготовлення КПК включає в себе процес високотемпературного спікання в інтервалі температур 1100-1400 ° С, під час якого проходить поєднання трьох компонент в суцільну комірку. До того ж, принцип роботи керамічної комірки складається з наступних етапів: на катоді відновлення кисню відбувається з утворенням негативно зарядженого іона кисню, потім через електроліт здійснюється транспорт іонів кисню до анода. Отже, під час виготовлення і роботи КПК можуть проходити процеси дифузії – «отруєння» електроліту, коли він збагачується складовими елементами електродів, що призводить до зниження ККД комірки.

Оскільки механізм відновлення кисню на поверхні катодного матеріалу є достатньо складним і багатостадійним, то в основному найбільші поляризаційні втрати відбуваються на катоді, особливо при зниженні робочої температури паливної комірки. З метою зниження цих втрат на катоді більшість зусиль відзначені в області формування композиту з електролітом [3], створення проміжного шару між катодом і електролітом [4], оптимізації умов виробництва, і важких покриттів пасти Pt або сітки в якості колектора струму [5]. Але кілька важливих питань, як і раніше залишаються: через проблеми деградації не демонструється довгострокова стабільність катодів. Тому, пошук і дослідження дешевших і більш спрощених за конструкцією матеріалів для катоду, якими досі залишаються матеріали зі структурою перовскиту на основі марганцю, кобальту чи фериту, є дуже актуальною задачею для вчених на сьогоднішній день як в Україні, так і у світі.

Nd_{1-x}Sr_xMnO₃ манганіт є альтернативним керамічним матеріалом для застосування в якості катода в КПК, що працює від 500 до 800 ° С. Легування Sr манганіт неодиму NdMnO₃ покращує хімічну стабільність матеріалу і збільшує його електропровідність. Sr є кращим легуючим елементом, оскільки він покращує коефіцієнт теплового розширення і забезпечує більш високу електричну провідність в зв'язку з утворенням катіонів Mn⁴⁺. За даними літератури світової наукової спільноти [6,7] саме легований манганіт неодиму складу Nd_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ вважається найбільш придатними катодними матеріалами для середньотемпературних ТОПК (500-800 ° С), тому що саме цього складу матеріал має коефіцієнт теплового розширення близький за питомим значенням ScSZ-електроліту [8], високу електродну активність і високу електропровідність при заданих температурах. В той же час практично не має інформації про мікроструктуру, фазову стійкість і довгостроковість цього матеріалу у робочому режимі, крім того, відсутні данні дослідження ефективності катода у комірках з електролітом на основі двооксиду цирконію, стабілізованого оксидами скандію та церію (SCZ), який має більш питомі властивості для середньотемпературного ТОПК.

За результатами попередньої роботи [9] на манганітах складу $(\text{Nd}_{0,67}\text{Sr}_{0,33})_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_{3\pm\Delta}$ ($x = 0$ і $0,2$) було встановлено, що зі збільшенням температури спікання у зразках з $x=0$ відбувається зменшення параметрів решітки манганітової фази, а після спікання при 1400°C виявлено наявність двох манганітових фаз з різним вмістом Sr. У зразках з надлишковим марганцем ($x=0,2$) реєструється незмінність параметрів решітки і стехіометрія по вмісту стронцію після спікання при всіх, зазначених вище температурах. Показано, що провідність кераміки з надлишковим марганцем в середньому в п'ять разів вище провідності кераміки без надлишку марганцю в діапазоні температур $550\text{--}800^\circ\text{C}$. Вперше виявлено, що тільки в зразку з $x=0,2$, спеченого при 1000°C , сформувалася мікроструктура кераміки з відкритою поруватістю $20\text{--}30\%$, розміром зерна $0,25\text{--}0,5\text{ мкм}$ і провідними властивостями, що відповідає вимогам до катоду для середньо температурних керамічних паливних комірок.

Метою цієї роботи є дослідження мікроструктури, фазового складу і електропровідні властивості катодного матеріалу складів $(\text{Nd}_{0,67}\text{Sr}_{0,33})_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_{3\pm\Delta}$ (NSMO) в залежності від вмісту надлишкового марганцю ($x = 0$ і $0,2$) при контакті з електролітом на основі двооксиду цирконію, стабілізованого оксидами скандію та церію $10\text{ мол.}\% \text{ Sc} + 1\text{ мол.}\% \text{ CeSZ}$ (SCSZ) при спіканні на низькій температурі 1000°C .

Вихідні порошки катодних і електролітичних матеріалів були виготовлені з використанням золь-гель методу і синтезовані при 700°C , та випалювалися при температурі 1000°C упродовж 3 годин. Порошки катоду NSMO з $x=0$ і $x=0,2$ були змішані у рівних масових пропорціях з порошком електроліту SCSZ у капронових камерах на двухвалковому млині у спиртовому розчині на швидкості 15 об/с упродовж 20 годин. Висушені порошки компактувалися у вигляді двох таблеток діаметром 10 мм . Далі зразки №1 ($x=0$) і №2 ($x=0,2$) спікалися при температурі 1000°C протягом 3 годин в атмосфері повітря. Вимірювання щільності зразків здійснювалося геометричним способом. Рентгенофазовий аналіз (РФА) зразків до і після спікання зроблений на установці Ultima IV в $\text{Cu K}\alpha$ випромінюванні ($30\text{ кВ} / 30\text{ мА}$). Вивчення мікроструктури зразків здійснювалося за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ) REM 106I. Для проведення дослідження електрофізичних властивостей зразків №1 і 2 використовували імпедансну спектроскопію. Вимірювання проводили в широкому частотному ($1\text{ Гц--}32\text{ МГц}$) та температурному ($20\text{--}200^\circ\text{C}$) діапазонах, застосовувавши аналізатор імпедансу 1260A Impedance / Gain-Phase Analyzer (Solartron Analytical). Срібні електроди одержували методом випалювання срібної пасті.

У таблиці 1 представлені результати дослідження рентгенофазового аналізу експериментальних зразків до і після спікання.

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень фазового складу, параметрів структури і енергії активації електропровідності зразків композиту до і після спікання в залежності від x

№ зразка	x	Фаза	Просторова група	Елементарний об'єм, $V, \text{\AA}^3$	Щільність, $\rho, \text{г/см}^3$	Енергія активації, $E_A, \text{еВ}$
До спікання						
1	0	SCSZ	Fm-3m	132,21	3,26	-
		NSMO	Pbnm	229,03		
2	0,2	SCSZ	Fm-3m	132,21	3,12	-
		NSMO	Pbnm	229,6		
Після спікання						
1	0	SCSZ	Fm-3m	132,243	3,35	0,52
		NSMO	Pbnm	229,00		
2	0,2	SCSZ	Fm-3m	132,43	3,56	0,38
		NSMO	<i>Pbnm</i>	229,05		

Як видно із даних таблиці спікання при 1000°C не призвело до змін фазового складу та величини елементарного об'єму в обох матеріалах композитів, а також не було виявлено жодних інших фаз. Однак вимір щільності показує, що усадка у зразку №2 говорить про те, що в цьому зразку реалізувалась перша стадія спікання, тобто припікання кристалітів один до одного без росту зерна. Це припущення підтверджуються даними СЕМ поверхонь сколів спечених зразків (рис.1).

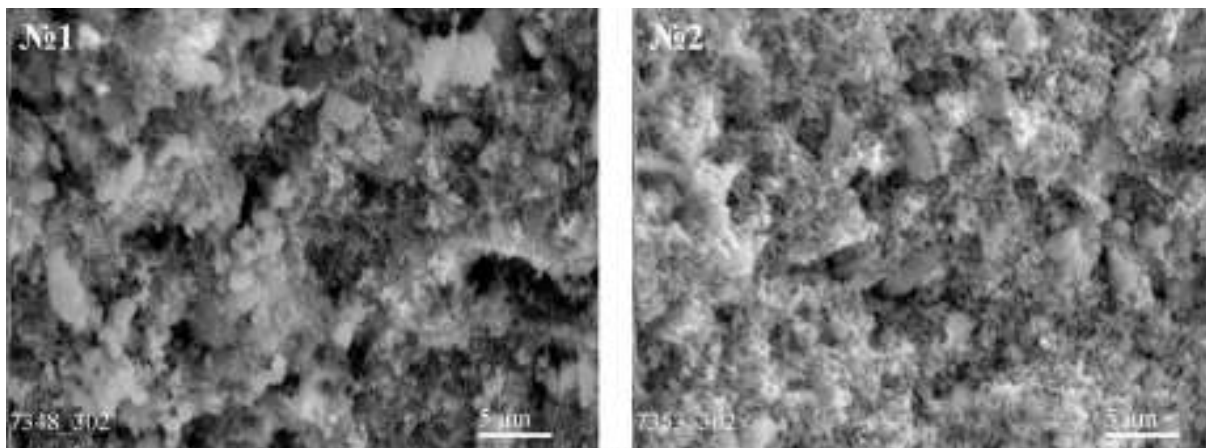


Рис.1. СЕМ фотографії поверхонь сколів зразків №1 і №2 після спікання при 1000 °С.

На рис.1 видно, що зразок №1 без надлишкового марганцю ($x=0$) після спікання залишився порошковим тілом з нерівномірним розподілом кристалітів катодного матеріалу по поверхні зерен електроліту, на відміну від зразка №2. Як видно, введення надлишкового марганцю ($x=0,2$) призвело до рівномірного зростання і розподілу по поверхні електроліту часток катодного матеріалу та формуванню перешийок між ними.

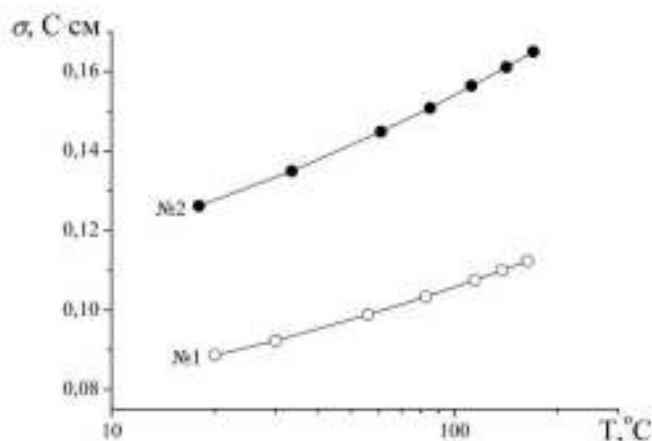


Рис. 2. Температурна залежність питомої електропровідності спечених зразків №1 і 2.

Експериментальні результати вимірювання електропровідності спечених зразків також показав суттєві різниці між двома зразками. На рис.2 представлені температурні залежності питомої електропровідності для зразків №1 і 2. Як видно із графіків провідність зразка №2 в майже два рази вища провідності зразка №1 на всьому температурному інтервалі. Із даних в таблиці 1 значення енергії активації також відрізняються. Енергія активації провідності для зразка з $x=0,2$ складає 0,38 еВ, що майже в два рази менше, ніж при $x=0$ (0,52 еВ). Це пов'язано з тим, що велика кількість марганцю знаходиться на поверхні сприяє спіканню і формуванню границі зерен, що призводить до зменшення енергетичного бар'єру для носіїв заряду.

Отже, за результатами проведених експериментальних досліджень керамічних зразків SCSZ - NSMO композитів в залежності від вмісту надлишкового марганцю ($x=0; 0,2$) можна зробити наступний висновок, що завдяки введенню надлишкового марганцю до складу катодного матеріалу на основі манганіту неодиму вдалось отримати більш ефективний за всіма параметрами катодний матеріал, призначений для середньотемпературних КПК.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф-71.

Література

1. Kawada T. Current electrolytes and catalysts. Handbook of fuel cells-fundamentals, technology and application, Eds.: W. Vielstich et al. Fuel Cell Technology and Applications, Wiley and Sons, Chichester, England, 2003. – Vol. 4 – P. 987.
2. O. Vasylyev, A. Smirnova, M. Brychevskiy et al. Structural, mechanical, and electrochemical properties of ceria and scandia stabilized zirconia // Mat. Sci. & Nanostructures. -2011. – V.1. – pp. 70-80.
3. E. P. Murray, S. A. Barnett. (La,Sr)MnO₃–(Ce,Gd)O₂–x composite cathodes for solid oxide fuel cells // Solid State Ionics, - 2001. - V. 143. - P. 265-273.
4. Y. H. Gong, W. J. Ji, B. Xie, and H. Q. Wang. Effect of YSZ electrolyte surface modification on the performance of LSM/YSZ composite cathode // Solid State Ionics. - 2011. - V.192. - P. 505.
5. Ze Liu, Mingfei Liu, Lei Yang, Meilin Liu. LSM-infiltrated LSCF cathodes for solid oxide fuel cells // Journal of Energy Chemistry. – 2013. - V. 22. - P. 555–559.
6. Y. Sakaki, Y. Takeda, A. Kato, N. Imanishi, O. Yamamoto, M. Hattori, M. Lio and Y. Esaki. Ln_{1-x}Sr_xMnO₃ (Ln=Pr, Nd, Sm and Gd) as the cathode material for solid oxide fuel cells // Solid State Ionics. – 1999. - V.118. - P. 187-194.
7. T.L. Wen, H. Tu, Z. Xu and O. Yamamoto. A study of (Pr, Nd, Sm)_{1-x}Sr_xMnO₃ cathode materials for solid oxide fuel cell // Solid State Ionics. – 1999. - V. 121. - P. 25-30.
8. S.T. Aruna, M. Muthuraman, K.C. Patil. Studies on strontium substituted rare earth manganites // Solid State Ionics. – 1999. - V. 120. - P. 275–280.
9. Новохацкая А.А., Акимов Г.Я. Использование избыточного марганца для создания структуры манганитовой керамики необходимой для катода керамических топливных ячеек. Сборник докладов Международной научной конференции «ФТТ-2016. Актуальные проблемы физики твердого тела», 22-25 ноября 2016, Т.3, с. 199-201.

УДК 624.016

ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ВНУТРІШНІМ ШАРОМ

магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н, ст. викл. Двойнос Я. Г., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

PROTECTIVE POLYETHYLENE PIPES FOR FIBER CABLE CONNECTION WITH ANTI-FRICTION INNER LAYER

undergraduate Hotskij Y.G., Ph.D., senior lecturer Dvoinos Y.G.,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

***Анотація.** Робота присвячена конструкції та технології виготовлення труб захисних, що використовуються в якості механічного захисту оптоволоконних кабелів зв'язку від зовнішнього впливу, а також в якості каналу для прокладання оптичного кабелю зв'язку. Прیدілено увагу сучасним технологіям монтажу труб та кабелю в труби, історії розвитку технології в Україні та розвинутих країнах, нормативно-технічній документації.*

Пропонується аналіз технічних рішень та технологій їх реалізації. Використана спрощена методика розрахунку розривних сил в кабелі під час його монтажу.

Сформульовано додаткові вимоги до труб захисних, що використовуються в якості механічного захисту оптоволоконних кабелів зв'язку. Зроблено висновки про склад лінії для виробництва таких труб.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів, буде цікава проектантам лінійних мереж зв'язку.

Abstract. The work is dedicated to the design and technology of protective tubes that are used as mechanical protection of fibre optic cables from external influence and as a channel for laying optic cables. Attention is paid to modern technology installation of pipes and cables in the tube, the history of technology in Ukraine and developed countries, regulatory and technical documentation.

An analysis of technical solutions and technology implementation, use simplified method of calculating the explosive force in the cable during its installation.

Formulated additional requirements for protective pipes used as mechanical protection of fibre optic cables. The conclusion about the composition of the line for the production of pipes.

Working primarily interested engineers - designers of standard equipment for the processing of polymeric materials will be interesting designer linear networks.

Ключові слова: труба з поліетилену, кабельна каналізація, оптоволоконний кабель, антифрикційне покриття.

Keywords: polyethylene pipes, sewage, cable, fibre optic cable, antifriction coating.

Одним з напрямків розвитку інформаційних технологій є зменшення вартості та енергозатрат прокладання, мінімізації кількості з'єднань телекомунікаційних оптоволоконних мереж.

Телекомунікаційний оптоволоконний кабель, найчастіше прокладається в канал (захисна труба з поліетилену), який закопано в ґрунт. Це забезпечує надійний захист кабелю від зовнішніх чинників, таких як несприятливі погодні явища, господарська діяльність людини тощо.

Нормативно-технічна документація організації захисту кабелів зв'язку постійно вдосконалюється, що викликано появою нових конструкцій, та технологій.

Стандарт 2004 року ДСТУ EN 50086-2-4:2004 Системи кабелепроводів для електричних установок. Частина 2-4. Окремі вимоги до підземних систем кабелепроводів (EN50086-2-4:1994, IDT) було доповнено ДСТУ 4549-1:2006 Системи кабельних трубопроводів. Частина 1. Загальні вимоги та методи випробування. Відповідно до наказу від 29.12.2015 № 213 "Про прийняття нормативних документів України, гармонізованих з міжнародними та європейськими нормативними документами, національних стандартів України, скасування нормативних документів України" прийнято ДСТУ EN 61386-24:2015 Системи кабелепроводів для електричних установок. Частина 24. Додаткові вимоги до підземних систем кабелепроводів (EN 61386-24:2010, IDT). Стандарт встановлює вимоги до виконання та випробування трубних систем, які прокладаються в землі, включаючи труби та трубну арматуру, для захисту та прокладання ізолюваних проводів та/або кабелів в електричних установках або у системах зв'язку.

Відповідно до термінів ДСТУ 4549-1:2006 "Кабельний трубопровід – складова частина закритої системи електропроводки з кільцевим поперечним перерізом, призначена для розміщення ізолюваних проводів і/або кабелів у електричних або телекомунікаційних установках, через яку їх протягують".

Провідний галузевий інститут України ПрАТ Діпрозв'язок розробив галузеві будівельні норми у сфері телекомунікацій: ГБН В.2.2-34620942-002:2015 «Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування». Відповідно до норми "прокладання кабельного трубопроводу безтраншейним способом із застосуванням кабелеукладачів дозволяється для ґрунтів 1–3 груп, водні перешкоди, болота".

Основні вимоги до захисної поліетиленової труби (далі ЗПТ): розміри труби, механічні параметри. Номінальний розмір ЗПТ відповідає зовнішньому розміру труби (від 8 мм до 50 мм), також регламентується внутрішній діаметр. Основні механічні параметри ЗПТ відповідають вимогам до експлуатації: стійкість до стискання (3 типи) забезпечує збереження круглої форми при навантаженні ґрунтом; спротив удару (2 групи) визначає можливість безтраншейної укладки, рисунок 1, під час якої на трубу діють ударні навантаження [1].

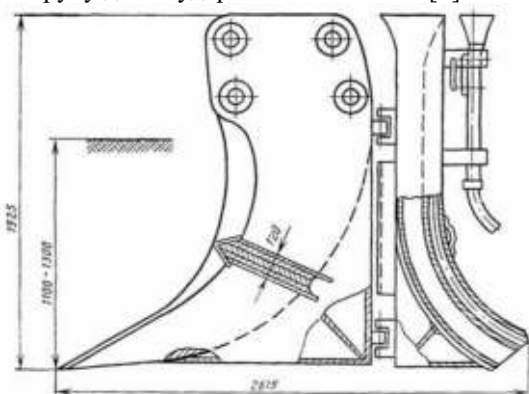


Рис 1. Ніж кабель – укладальний типу НКП–1Д

У підготовлені канали кабелі прокладаються як методом задувки, так і методом затягування ручним способом. Відповідно до ГБН В.2.2-34620942-002:2015 прокладання захисної поліетиленової трубки діаметром від 8 мм до 50 мм з наступною задувкою в неї до 25 поліетиленових мікротрубок діаметром від 3 мм до 12 мм для прокладання мікрокабелів. Задування кабелів або пневмопрокладка в раніше прокладену захисну поліетиленову трубку високої щільності - це метод, який дозволяє прокласти кабель у трубку,

використовуючи силу стисненого повітря. Задувати можна не тільки оптичні, але і металеві кабелі та мікротрубки. Для задувки використовуються труби з внутрішнім покриттям спеціальною плівкою або з насічкою внутрішньої поверхні. Коефіцієнт тертя внутрішньої поверхні повинен бути менше ніж 0,1. Діаметр кабелю, що вводиться, повинен бути приблизно в 2 рази менше від внутрішнього діаметра трубки (таблиця 11.3) Для задувки в поліетиленові трубки рекомендується застосовувати оптичні кабелі полегшеної конструкції (неброньовані кабелі) Зазначені співвідношення діаметрів трубки і кабелю наведено з урахуванням можливості введення кабелю методом задування від 500 м до 2000 м з однієї установки.

Оптичні кабелі, призначені для задувки в поліетиленові трубки, повинні мати такі параметри: - зовнішню оболонку з ПЕ середньої або високої щільності для забезпечення низького коефіцієнта тертя між кабелем і каналом; у разі застосування кабелів з оболонкою з іншого матеріалу, бажано, щоб цей коефіцієнт був не гіршим; - діаметр обраного кабелю не повинен бути більше ніж половина діаметра каналу (відповідно до таблиці 11.3); - маса оптичного кабелю повинна бути в межах від 0,1 кг/пог.м до 0,3 кг/пог.м; - жорсткість кабелю повинна бути низькою (в межах від $1\text{Н}\times\text{м}^2$ до $3\text{Н}\times\text{м}^2$); - допустиме розтягувальне зусилля повинне бути не менше ніж 1,0 кН.



Рис. 2. ЗПТ 40/35, довжина труби в бухті 1750 метрів



Рис. 3. ЗПТ 40/35 з ребристою внутрішньою стінкою ООО "РТЗ" [2]

Відповідно до вимог нормативно-технічної документації та будівельних норм виробники ЗПТ затвердили технічні умови, та випускають відповідну продукцію, наприклад "Завод поліетиленових виробів ТОВ "Планета Пластик" [1] виробляє труби поліетиленові для захисту оптоволоконних кабелів зв'язку з поліетилену низького тиску високої щільності (ПНД), класу ПЕ 63, ПЕ 100, діаметром від 14 до 50 мм згідно ТУ У 25.2-32375670-01-2003. ООО "РТЗ" Рубіжанський Трубний Завод м. Рубіжне [2] відповідно до ТУ У В.2.7-25.2-32926466-007:2012 "Труби з поліетилену захисні для прокладання волоконно-оптичних кабелів зв'язку".

Особливість ЗПТ у великій довжині труби в бухті, рисунок 2, що пов'язано з необхідністю мінімізувати стики кабелю зв'язку. Станом на травень 2017 р ЗПТ з внутрішнім антифрикційним шаром на Україні не виготовляється, а використовується ребриста внутрішня поверхня труби, рисунок 3 або змащену мінеральним мастилом внутрішню стінку труби. Мастило (лубрікант) використовується для пневмопрокладки кабелю (задувки) в ЗПТ. Витрата мастила – $0,4\div 0,5$ л/км, найбільш поширені в Україні Plumettaz CJL 1032 (Швейцарія), Prelube-5000 (США).

Технології затягування кабелю у ЗПТ після її укладки наступні:

1. "заштовхування" кабелю роликовим пристроєм;
2. "задування" тягової смужки з наступним затягування кабелю цією смужкою
3. "задування" та "заштовхування" безпосередньо кабелю – пневматична прокладка

Найсучаснішим способом прокладки є пневматична, – на вході до захисної труби встановлюється пристрій (рисунок 4), який заштовхує кабель всередину труби механічно, та пневматично (на кінці закріплено герметизуючий пристрій, – "парашут").



Рис 4. Пристрій для розміщення кабелів у труби фірми SHERMAN+REILLY™ (USA), модель Minijet® [3]

Основними технічними перевагами методу пневматичної прокладки є відсутність зосереджених тягнучих зусиль, що діють на оптоволоконний кабель в процесі його просування по каналу, зведення до мінімуму вимог до працюючих на стиск зміцнювальних покриттів окремих світловодів і їх збірок, економія дефіцитної площі кабельних каналів і можливість заміни розгалужувальних муфт на розгалужувальні муфти трубчатих каналів [4, с. 330].

Такий спосіб дозволяє уникнути значних механічних навантажень, що у свою чергу дозволяє використати економний слабо армований кабель. Прикладом є кабелі марки O-CFP(SR)D-24E9/125 зовнішній діаметр якого 10,4 мм; динамічна сила натягування – 600 Н; вага – 113 кг/км; ціна 26,19 грн/м. п. [5], та кабель марки O-CFP(SR)D-24E9/125/Flex зовнішній діаметр якого 9,6 мм, динамічна сила натягування – $N_{\text{макс}}=300$ Н; вага – $M=96$ кг/км; ціна 24,60 грн/м.п. Оболонку кабелів та захисної труби виготовлено з поліетилену високої густини, динамічний коефіцієнт тертя відповідно $\mu=0,13$, що дозволяє прокласти кабель, без змащування і його пошкодження на максимальну довжину, м:

$$N = LMg\mu < N_i \Rightarrow L < \frac{N_i}{Mg\mu} = \frac{300}{96 \cdot 9,81 \cdot 0,13} = 2450$$

В той-же час довжина захисної труби у бухті може доходити до 5000 м.

Використання у конструкції захисної труби внутрішнього антифрикційного шару (рисунок 5, позиція 5) дозволяє зменшити динамічний коефіцієнт тертя до $\mu=0,06$, а довжину прокладки до 5,3 км [6].

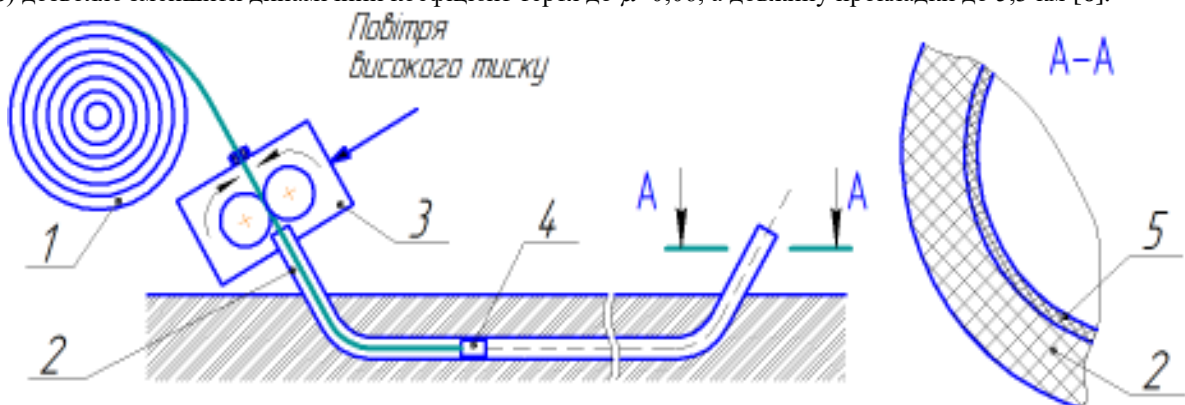


Рис. 5. Принципова схема прокладки оптоволоконного кабелю методом пневматичної укладки
1 – бухта оптоволоконного кабелю; 2 – захисна поліетиленова труба;

3 – пристрій; 4 – парашут; 5 – антифрикційний шар

Матеріалом для антифрикційного шару на внутрішній поверхні захисної труби є композиція силікону і високомолекулярного поліетилену високої щільності.

Висновок: виготовлення обладнання для екструзії полімерної композиції антифрикційного шару труб для захисту оптоволоконного кабелю є актуальним, а дослідження процесу екструзійного перемішування даної композиції – важливим. Базовим параметром якості антифрикційного шару приймається динамічний коефіцієнт тертя, значення якого має бути $0,1 \pm 0,075$.

Література:

1. <http://www.planetaplast.com/kontakti/> (дата звернення: 22.05.2017)
2. <http://www.rtz.com.ua/gallery.html> (дата звернення: 22.05.2017)
3. http://sherman-reilly.com/news/products_list/minijet/ (дата звернення: 22.05.2017)
4. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А. Б. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2006. – 632 с., ил.
5. <http://asp24.com.ua/made-in-ukraine/otl-m-2-7-p-8x12e1-96-volokon/> (дата звернення: 17.10.2016).
6. Двойнос Я.Г., Гоцький Я. Г. Захисні поліетиленові труби для оптоволоконних кабелів зв'язку // Збірник тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (06-07 грудня 2016 р. м. Київ), С. 40–41.

УДК 661.681

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Рябик П.В., канд. техн. наук, доцент, Опарин С.А.,
канд. техн. наук, доцент, Гриднева Т.В.

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,
Днепр, Украина

THERMODYNAMIC EVALUATION OF THE PRODUCTION OF SILICON FROM RICE HUSK

Rabic P. V., Oparin, S. A., Gridneva T. V.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

Аннотация: Кремний является одним из самых распространенным материалов, который находит применение во многих областях промышленности. Его применяют в производстве полупроводников, огнеупоров, для изготовления солнечных батарей.

Для традиционных технологий в Украине используют хлоридный метод, который имеет высокую стоимость, большие затраты на производство и влечет за собой экологическую опасность, которая связана с транспортировкой токсичного и летучего хлорсодержащего сырья.

Альтернативным сырьевым источником для получения кремния являются многотоннажные отходы рисового производства – рисовая шелуха. По своему составу она состоит из лигнина, целлюлозы и 20% диоксида кремния. Подвергнув специальной обработке рисовую шелуху, возможно получить кремний, который будет обеспечивать всем требованиям для производства, что в свою очередь, открывает новые возобновляемые источники сырья для производства кристаллического кремния.

Разработка малоотходной технологии переработки минеральной части рисовой шелухи в кристаллический кремний, а органической части – в жидкие и газообразные углеводородные продукты с широким диапазоном температур кипения является актуальной задачей, как с экономической, так и с экологической точки зрения.

Целью данной работы является установление основных термодинамических параметров процесса получения кремния из рисовой шелухи. По данным термодинамического анализа были установлены зависимости равновесных концентрированных фаз от температуры и давления в системах рисовая шелуха – аргон, рисовая шелуха – водород. В работе установлены оптимальные условия для образования равновесного состава фаз. Определено, что изменение давления не оказывает существенного влияния на равновесный состав системы, а влияние оказывает только температура и среда.

Abstract: Silicon is one of the most common materials that finds application in many industries. It is used in the semiconductor industry, refractories for the manufacture of solar panels.

For the traditional technologies used in Ukraine is the chloride method, which has high cost, the high cost of production, and entails environmental risk associated with transportation of toxic and volatile chlorine-containing raw materials.

Alternative raw material source for the production of silicon are large-tonnage waste of rice production – rice husk. In composition it consists of lignin, cellulose, and 20% of silicon dioxide. Exposing the special treatment of rice husk, it is possible to obtain silicon, which will provide all the requirements for production, which in turn opens up new renewable sources of raw materials for the production of crystalline silicon.

The development of low-waste technology for processing mineral rice husk in crystalline silicon, and the organic part in a liquid and gaseous hydrocarbon products with a wide range of boiling points is an important task, both from an economic and from an environmental point of view.

The aim of this work is the determination of the main thermodynamic parameters of the process of obtaining silicon from rice husk. According to thermodynamic analysis was established based on the equilibrium of the concentrated phase from the temperature and pressure in the systems of rice husk – argon, rice husk – hydrogen. In the work the optimum conditions for the formation of the equilibrium composition of the phases. It is determined that the pressure change has no significant influence on the equilibrium composition of the system, as influenced by temperature and environment.

Ключевые слова: кремний, рисовая шелуха, среда, аргон, водород, термодинамика, анализ, оценка

Keywords: silicon, rice husk, environment, argon, hydrogen, thermodynamics, analysis, evaluation

Постановка проблемы. Поликристаллический кремний - материал очень высокой чистоты, и вплоть до 2000-2001 гг. являлся основой только для производства полупроводников. Базой же солнечной энергетики были в основном отходы «электронной» индустрии: некондиционный поликремний, получаемый в цикле производства поликремния электронного. За последние годы ситуация во многом изменилась: свыше 60% общей потребности солнечной энергетики обеспечивает поликремний, специально произведенный для неё. Мировое производство поликристаллического кремния составляет 20 тысяч тонн в год, и ежегодно увеличивается на 18-20%. Более 90% мирового рынка поликристаллического кремния контролируют 10 крупнейших компаний США, Японии, Германии и Италии. Мировым лидером по производству поликристаллического кремния солнечного качества является корпорация SGS Asimi. Норвежской группе REC - Renewable Energy Corporation принадлежит также один из крупнейших производителей кремниевых пластин - Scan Wafer ASA.

Традиционно в Украине используется хлоридный (трихлорсилановый) метод получения поликристаллического кремния из технического кремния, который был разработан и реализован в промышленности еще в середине 50-х годов фирмой Siemens.

Однако «трихлорсилановая» технология несет в себе первоначально заложенную экологическую опасность (разгерметизации труб, выбросы токсических веществ в атмосферу т.д.). Дело в том, что все хлорпроизводные кремния и хлористый водород коррозионно агрессивны по отношению к конструкционным материалам и вызывают местную коррозию, приводящую к быстрому и катастрофическому разрушению оборудования. По мнению экологов, даже если производство будет идти по доработанному «замкнутому» циклу, оно будет сохранять такие первоначальные черты как: высокая энергоемкость, низкий выход продукта и экологическую опасность. К тому же, транспортировка токсичного и летучего хлорсодержащего сырья сопряжена с риском разгерметизации и заражением всего живого в радиусе многих километров.

Цель статьи. Учитывая высокую стоимость поликристаллического кремния и большие энергозатраты на реализацию технологических процессов получения кремния на основе кристаллического SiO₂, большой практический интерес представляет разработка технологии производства кремния из рисовой шелухи (РШ), которая является крупнотоннажным отходом рисового производства. РШ содержит в своем составе лигнин, целлюлозу, и минеральную часть. Методом элементного анализа установлено, что РШ содержит, %масс. : SiO₂ - 22.24, С - 35.77, О - 36.59, Н - 5.05, N - 0.32 и может после специальной подготовки использоваться в качестве дешевого возобновляемого источника сырья для производства кристаллического кремния.

Разработка малоотходной технологии переработки минеральной части РШ в кристаллический кремний, а органической части - в жидкие и газообразные углеводородные продукты с широким диапазоном температур кипения является актуальной задачей как с экономической, так и с экологической точки зрения.

Основная часть. В настоящей работе представлены сравнительные результаты термодинамических исследований получения кремния из рисовой шелухи при различных средах.

Так как кремний в рисовой шелухе представляет собой соединение диоксида кремния, а нашей задачей является получение чистого кремния, то диоксид кремния необходимо разложить путем пиролиза на компоненты. Для этой цели возможно использование инертных и восстановительных сред, которые в тоже время и являются носителями твердых частиц рисовой шелухи в аппарате. В качестве инертной среды использовали аргон, а в качестве восстановительной – водород.

Расчеты выполнялись на ЭВМ методом минимизации полного приведенного изобарно-изотермического потенциала с использованием стандартного программного комплекса ASTRA 4.0, который позволяет рассчитать равновесные составы на основе нахождения максимума энтропии системы.

При проведении расчетов конденсированные фазы рассматривались в виде чистых веществ, а газовая фаза представлялась в виде смеси идеальных газов.

Результаты расчета системы РШ- аргон, представлены на рис. 1. Исходный состав системы в %масс. : РШ - 100, Аг - 2.

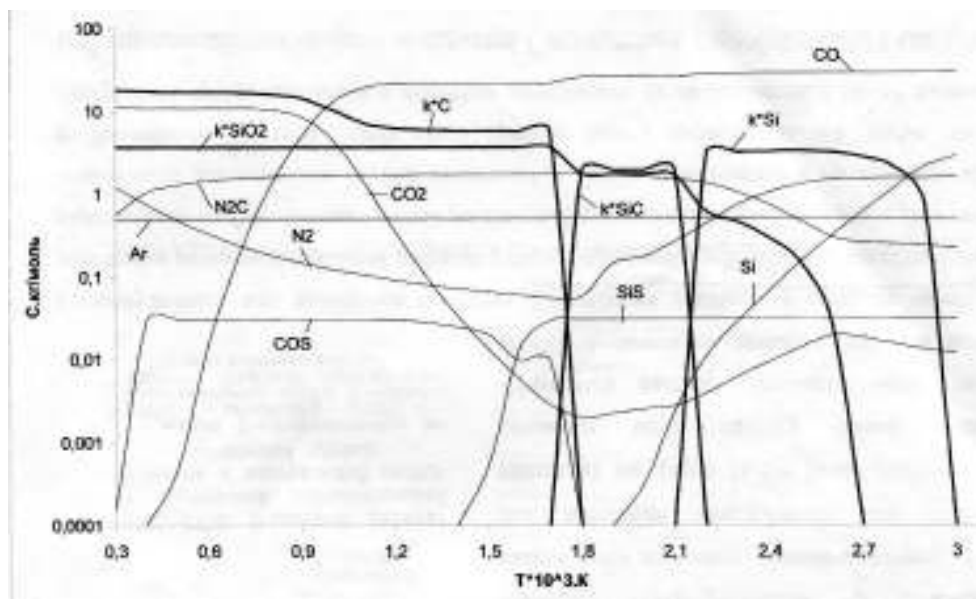


Рис 1. Зависимость равновесного состава системы РШ-Аг от температуры.

В качестве равновесных конденсированных фаз в температурном интервале (300-3000) К зарегистрированы двуокись кремния, углерод, карбид кремния и кремний. Как видно из рис.1, концентрация углерода постепенно уменьшается и в диапазоне температуре 1700-1800К углерод полностью переходит в карбид кремния. В этом же температурном интервале наблюдается заметное уменьшение концентрации двуокиси кремния. В температурном интервале 1800-2100К в конденсированной фазе находятся карбид кремния и двуокись кремния. В интервале температур 2100-2200К начинается образование конденсированной фазы кремния, а карбид кремния полностью разлагается. В температурном интервале 2200-2700 существуют две конденсированные фазы: двуокись кремния и кремний. В интервале 2700-3000 в конденсированной фазе остается только кремний. Во всем интервале температур наблюдается рост концентрации окиси углерода, а при температуре 1900К часть кремния переходит в газовую фазу и далее увеличивает свою концентрацию. Изменение давления от 0,01 до 1,0 МПа не оказывает существенного влияния на равновесный состав системы.

Термодинамический анализ системы РШ-Н₂, представлен на рис. 2. Исходный состав системы в % масс.: 100% РШ, 10%Н₂.

Как видно из рис.2, равновесный выход кремния начинается при температуре 2000-2050К. При этом, концентрация двуокиси кремния и карбида кремния с ростом концентрации кремния снижается. В области температур (2300-2800)К в конденсированной фазе находится только кремний. Так же наблюдается рост концентрации СО и Н₂ в интервале температур (300-1200) К. Так же наблюдается рост концентрации газовой фазы кремния в интервале(2000-3000)К. Изменение давления от 0,01 до 1,0 МПа также не оказывает существенного влияния на равновесный состав системы.

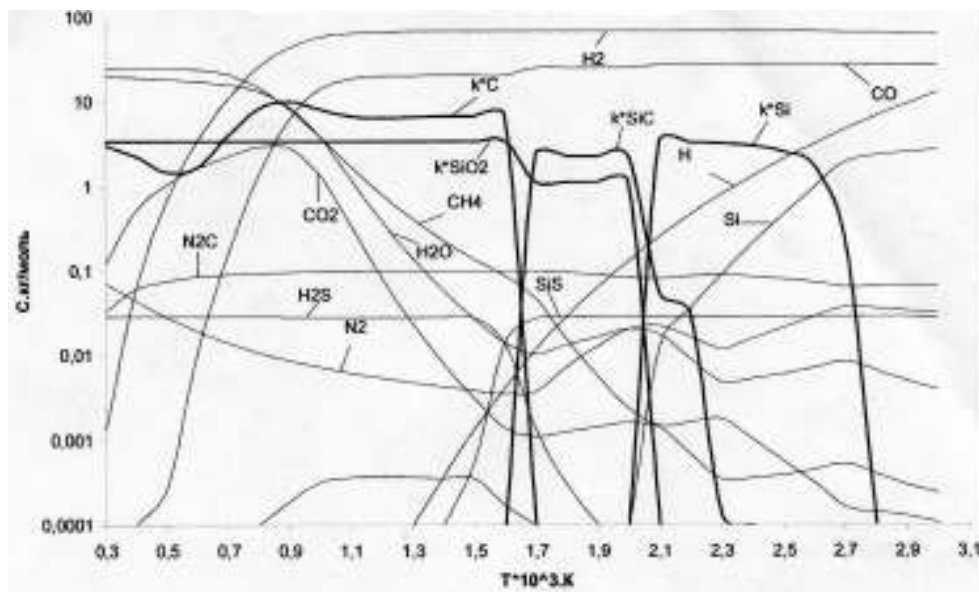


Рис 2. Зависимость равновесного состава системы РШ-Н₂ от температуры

Выводы: В результате проведения термодинамического анализа дана оценка термодинамической вероятности процесса получения кремния из рисовой шелухи в инертных и восстановительных средах при различных температурах и давлении. Установлено, что на равновесный состав системы оказывает существенное влияние среда и температура, а изменение давления от 0,1 до 1,0 МПа не приводит существенному изменению состава системы.

УДК 664.38

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКСТРУДИРОВАННОГО ЯДРА ПОДСОЛНЕЧНИКА

Евлаш В.В., д-р техн. наук, профессор, Потапов В.А., д-р техн. наук, профессор
Никитин С.В., аспирант

Харьковский государственный университет питания и торговли, г. Харьков
Фотченко К. В., директор ООО «НАТЕ ПЛЮС», г. Харьков

RESEARCH OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND FUNCTIONAL- TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF THE EXTRUDED SUNFLOWER KERNEL

Evlash V.V, Dr. Tech. Sciences, Professor, Potapov V.A, Dr. Tech. Sciences,
Professor

Nikitin S.V, postgraduate student
Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv
Fotchenko K.V. director LLC "NATE PLUS", Kharkiv

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований экструдированного ядра семян подсолнечника. Показано, что перспективным источником пищевого белка являются вторичные ресурсы масложировой промышленности, получаемые при переработке семян подсолнечника, в том числе экструдированное безлузговое ядро семян подсолнечника, полученные при низких

температурах екструзії до 40 °C. Недостатками существующих технологий переработки семян подсолнечника и получения масла, являются высокие температурные режимы, ведущие к глубокой денатурации белков семян, что исключает возможность получения из них пищевых белковых продуктов без дополнительной обработки. Нами проведены исследования функционально- технологических свойств экструдированного безлузгового ядра семян подсолнечника, полученного по инновационной комплексной технологии переработки семян подсолнечника, с целью использования при производстве кондитерских изделий повышенной пищевой ценности. При проведении экспериментальных исследований использовали стандартные методики для семян и жмыхи, а также современные инструментальные методы биохимического, физико- химического и микробиологического анализа. Показано, что экструдированные ядра подсолнечника обладает высокой пищевой и биологической ценностью, что позволяет использовать его в качестве пищевого ингредиента при разработке рецептов продуктов питания, в том числе кондитерских изделий с повышенной пищевой ценностью. Высокая водоудерживающая и жиродерживающая способности безлузгового экструдированного ядра семян подсолнечника обуславливают эффективность его использования в качестве пищевого ингредиента, обладающего структурирующим, стабилизирующим и эмульгирующим свойством. Введение экструдированного ядра семян подсолнечника в состав пищевых систем, характеризующихся пластическими свойствами, таких, как кондитерские массы, обеспечит, наряду с повышением пищевой ценности, формирование необходимых структурно-реологических свойств, а также придает продукту новое качество, что позволяет отнести его к низко аллергенным, безглютеновым продуктам.

Abstract: The article presents the results of experimental studies of the extruded kernels of sunflower seeds. It is shown that the secondary sources of the fat-and-oil industry, obtained during the processing of sunflower seeds, including the extruded core of sunflower seeds, obtained at low extrusion temperatures up to 40 °C, are a promising source of food protein. The disadvantages of existing technologies for processing sunflower seeds and obtaining oil are high temperature regimes leading to deep denaturation of seed proteins, which excludes the possibility of obtaining food protein products from them without additional processing. We conducted research on the functional and technological properties of the extruded kernels of sunflower seeds obtained using the innovative complex technology of processing sunflower seeds for use in the production of confectionery products of increased nutritional value. In carrying out experimental studies, standard techniques for seeds and oilcake were used, as well as modern instrumental methods for biochemical, physicochemical and microbiological analysis. It is shown that the extruded sunflower kernels have high food and biological value, which allows using it as a food ingredient in the development of food formulas, including confectionery products with increased nutritional value. The high water-retaining and fat-retaining capacity of the extruded gluten-free kernels of sunflower seeds determines the efficiency of its use as a food ingredient with a structuring, stabilizing and emulsifying property. The introduction of the extruded kernels of sunflower seeds into the composition of food systems characterized by plastic properties, such as confectionary masses, will provide, along with an increase in nutritional value, the formation of the necessary structural and rheological properties, and also gives the product a new quality that allows it to be classified as low allergenic, gluten-free products.

Ключевые слова: ядра семян подсолнечника, экструдированный продукт, физико-химические свойства.

Keywords: kernels of sunflower seeds, extruded product, physical-chemical properties.,

Современные тенденции расширения ассортимента продуктов питания ориентированы на создание сбалансированной по пищевой ценности продукции, удовлетворяющей физиологические потребности различных групп населения. Одним из приоритетных направлений здесь является: повышение биологической ценности продукта за счет внесения в рецептурный состав высокобелковых ингредиентов [1-2]. Перспективным источником пищевого белка являются вторичные ресурсы масложировой промышленности, получаемые при переработке семян подсолнечника, в том числе экструдированное безлузговое ядро семян подсолнечника, полученные при низких температурах экструзии.

Наиболее ценными их свойствами являются: высокое содержание белка, отсутствие токсичных и антипитательных веществ, низкая себестоимость. Недостатками других технологий переработки семян подсолнечника и получения масла, являются высокие температурные режимы, ведущие к глубокой денатурации белков семян, что исключает возможность получения из них пищевых белковых продуктов без дополнительной обработки.

Нами проведены исследования функционально- технологических свойств экструдированного безлузгового ядра семян подсолнечника, полученного по инновационной комплексной технологии переработки семян подсолнечника, с целью использования при производстве кондитерских изделий повышенной пищевой ценности.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования использовали экструдированное безлузговое ядро семян подсолнечника. При проведении экспериментальных исследований использовали стандартные методики для семян и жмыха, а также современные инструментальные методы биохимического, физико-химического и микробиологического анализа.

Содержание сырого жира и влаги определяли с использованием ЯМР-релаксометра minispec mq-20 (Bruker, Германия) согласно ГОСТ 8.597.

Массовую долю белка определяли с использованием системы количественной идентификации N2/белка DKL8 (VELP SCIENTIFICA, Италия) в соответствии с ГОСТ 13496.4.

Биологическую ценность белкового комплекса изучали путем экспериментального определения аминокислотного состава с использованием системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-105М», фирма-изготовитель Люмэкс (Россия) [5].

Относительную биологическую ценность (ОБЦ) белковых продуктов определяли экспресс-методом с использованием инфузорий *Tetrahymena pyriformis* в соответствии с рекомендациями Игнатьева А.Д. с соавторами [6].

Массовую долю клетчатки определяли на установке для анализа клетчатки FIBRE THERM FT12 (Gerhardt, Германия) в соответствии с ГОСТ 31675.

Массовую долю жира в белковом комплексе определяли на автоматической установке для твердожидкостной экстракции SOXTHERM SOX414a (Gerhardt, Германия) согласно руководству пользователя и ГОСТ 10857.

Функционально-технологические свойства белковых продуктов жиродерживающую (ЖУС), вододерживающую (ВУС), жиромульгирующую (ЖЭС) способности определяли по стандартным методикам, рекомендованным в пищевой промышленности.

Жирнокислотный состав липидов определяли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором и интегратором «Кристалл 5000».

Результаты исследований

При экструзии сырье за счет сухого трения подвергается кратковременному воздействию высокого давления, поэтому конечный продукт обогащен белками и жирами в максимально перевариваемой форме. Особенностью использования данного метода является экструзия при низких температурах до 40 °С. В процессе экструзии содержание растворимых веществ повышается в 5-8 раз. Экструзионная обработка повышает перевариваемость белков, делает более доступными аминокислоты вследствие разрушения в молекулах белка вторичных связей. В результате разрыва стенок жировых клеток повышается доступность масла, увеличивается энергетическая ценность продукта. Повышается стабильность жиров благодаря тому, что такие ферменты как липаза, вызывающие прогоркание масел, разрушаются в процессе экструзии, а лецитин и токоферолы, являющиеся природными стабилизаторами, сохраняют полную активность.

Исследуемый образец экструдированного безлузгового ядра семян подсолнечника представлен в виде сыпучей массы однородных по размеру частиц, что обуславливает относительную легкость введения его в рецептуру пищевых продуктов. При оценке возможности введения экструдированного ядра семян подсолнечника в кондитерские изделия с целью повышения их пищевой и биологической ценности изучали пищевую ценность экструдированного ядра.

Образец не имеет отклонений во вкусе и запахе, характеризуется невыраженным, с легким травянистым оттенком вкусом, свойственным семенам подсолнечника без специфического маслянистого привкуса. Анализ физико-химических показателей качества, представленный в таблице, показывает, что экструдированное ядро подсолнечника характеризуется достаточно высоким содержанием белка (42,7%), и значительно меньшим содержанием жира (25,67%).

Таблица 1 – Физико-химические показатели качества экструдированного безлузгового ядра подсолнечника

Массовая доля влаги и летучих в-в, %	8,2
Массовая доля сырого протеина в пересчете на сухое в-во, %:	42,7
Массовая доля сырого жира в пересчете на сухое в-во, %:	25,67
массовая доля сырой клетчатки, % :	11,87
Массовая доля крахмала, %	12,53
Массовая доля хлорогеновой кислоты, %	0,3

Массовая доля витамина Е, мг%,	15,4
Массовая доля глютена, мг/кг	менее 5

Как видно из таблицы 1 экструдированное безлузговое ядро подсолнечника содержит значительное количество антиоксидантов: витамина Е 5,4 мг% и хлорагеновой кислоты 0,3 %, которая влияет на обмен щавелевой кислоты в организме человека и предупреждает подагру. Следует отметить что такое свойство экструдированного ядра подсолнечника, как содержание глютена (массовая доля глютена, мг/кг менее 5) позволяет отнести его к безглютеновым продуктам. Экструдированное ядро подсолнечника изучали на содержание ГМО. Было установлено, что экструдированное ядро подсолнечника не содержит генетически модифицированную ДНК, которая имеет целевые последовательности промотора 35S и NOS-терминатора.

При изучении состава белка экструдированного подсолнечного ядра, полученного по инновационной ресурсосберегающей комплексной технологии переработки семян подсолнечника, выявлено, что разработанная технология не приводит к существенному изменению нативного состава аминокислот белковой части ядра подсолнечника. Содержание незаменимых аминокислот в белковом комплексе экструдированного ядра составляет более 36 %. Первой лимитирующей аминокислотой является лизин. При оценке показателей, определяющих физиологическую ценность масла, содержащегося в экструдированном ядре подсолнечника, установлено, что разработанная технология оказывает щадящее воздействие на липидную часть ядра подсолнечника и позволяет максимально сохранить в получаемом подсолнечном масле жирорастворимые физиологически ценные нутриенты в нативной форме, а также заменимые и незаменимые жирные кислоты.

Таблица 2. Жирно-кислотный состав масла семян подсолнечника

Требования ГОСТ 30623-98 «Масла растительные и маргариновая продукция». Жирнокислотный состав, %	Результаты анализа, %
Миристиновая кислота: не более 0,2	0,07
Пальмитиновая кислота: от 5,6 до 7,6	5,96
Пальмитолеиновая кислота: не более 0,3	0,07
Стеариновая кислота: от 2,7 до 6,5	3,02
Олеиновая кислота: от 14,0 до 39,4	24,14
Линолевая кислота: от 18,3 до 74,0	65,44
Линоленовая кислота: не более 0,2	0,07
Арахидоновая кислота: от 0,2 до 0,4	0,21
Гадолеиновая кислота: не более 0,2	0,14
Бегеновая кислота: от 0,5 до 1,3	0,64
Эруковая кислота: не более 0,2	Менее 0,2
Докозациеновая кислота: не более 0,3	Менее 0,01
Лигноцериновая кислота: от 0,2 до 0,3	0,24

Как видно из таблицы образец масла, полученного по инновационной ресурсосберегающей, комплексной технологии переработки семян подсолнечника соответствует требованиям ГОСТ 30623-98 по показателю качества – жирно-кислотный состав. Показатели окислительной порчи экструдированного ядра подсолнечника, рассчитанные с учетом содержания масла, находятся в пределах нормы, посторонние, металломагнитные примеси и зараженность вредителями отсутствуют. По показателям безопасности экструдированное ядро подсолнечника соответствует требованиям к концентратам пищевых белков и может быть рекомендовано для использования в пищевых технологиях в качестве функционального ингредиента.

В целом, результаты испытаний показателей безопасности и пищевой ценности позволяют отнести исследуемый образец экструдированного ядра подсолнечника к категории стандартного пищевого сырья. При оценке технологически функциональных свойств экструдированного ядра были изучены эмульгирующая (ЖЭС), водо- и жиродерживающая (ВУС, ЖУС) способности, которые являются определяющими при формировании консистенции готовой продукции. Выявлено, что по сравнению с жмыхом подсолнечника, полученным методом прессования, эффективность технологически функциональных свойств экструдированного подсолнечного ядра увеличилась на 15-20%.

Выводы

Исследуемый образец экструдированного ядра подсолнечника богат белками, усвояемыми углеводами, содержит незаменимые жирные кислоты, витамины, макро и микроэлементы, т.е. обладает высокой пищевой и биологической ценностью, что позволяет использовать его в качестве пищевого ингредиента при разработке рецептур продуктов питания, в том числе кондитерских изделий с повышенной пищевой ценностью. Высокая водо- и жиростойкая, а также жиромодулирующая способности беззубового экструдированного ядра семян подсолнечника обуславливают эффективность его использования в качестве пищевого ингредиента, обладающего структурирующим, стабилизирующим и эмульгирующим свойством. Введение экструдированного ядра семян подсолнечника в состав пищевых систем, характеризующихся пластическими свойствами, таких, как кондитерские массы, обеспечит, наряду с повышением пищевой ценности, формирование необходимых структурно-реологических свойств, а также придаст продукту новое качество, что позволяет отнести его к низкоаллергенным, безглютеновым продуктам. Перспективой дальнейших исследований является выбор оптимальных режимов экструдирования и последующей термической обработки с целью минимизации энергозатрат и сохранения высокотехнологических свойств.

Литература

1. Позняковский П.М. Гигиенические основы питания, качество и безопасность пищевых продуктов / – Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2004. – 556 с.
2. Савенкова Т.В. Стратегия инновационного развития кондитерской отрасли. Пищевые ингредиенты и быстрые продуктовые инновации / Т.В. Савенкова // Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки. – 2013. – № 1. – С. 44–47.
3. Резниченко И.Ю. Методология проектирования кондитерских изделий функционального назначения / И.Ю. Резниченко, Ю.А. Алёшина, А.И. Галиева, Е.Ю. Егорова // Пищевая промышленность. – 2012. – № 9. – С. 28–30.
4. Gerasimenko E.O. Prospects of the "Green" Technologies of the Complex Processing Of Sunflower Seeds / E.O. Gerasimenko, E.A. Butina, S.A. Kharchenko, E.P. Achmiz, O.S. Vorontsova // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – March – April- №7(2). – P.609-623.
5. МР 04-38-2009 Система капиллярного электрофореза Капель®. Определение протеиногенных аминокислот в комбикормах и сырье.
6. Игнатьев А.Д., Исаев М.К., Долгов В.А. и др. Модификация метода биологической оценки пищевых продуктов с помощью реснитчатой инфузории тетрагимениформис // Вопросы питания. 1980. № 1, С. 70-71.
7. Щербаков В.Г. Лабораторный практикум по биохимии и товароведению масличного сырья / В.Г. Щербаков, С.Б. Иваницкий, В.Г. Лобанов. – М.: Колос, 1999. 128 с.

УДК: 628.16.045.5–047.58:628.165

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

**Тришин Ф.А к.т.н, Трач А.Р. магистр, Орловская Ю. В. аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий**

IMPROVEMENT OF ENERGY-EFFICIENCY OF ICE BLOCK FORMATION PROCESS IN ULTRASONIC FIELD

**Trishin F. A., PhD, Trach A. R., master, Orlovskaya Yu. V., postgraduate student
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa**

***Аннотация:** Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей. Было проведено численное моделирование влияния пористости на процесс кристаллизации, установлено, что пористость блока льда является значительным фактором, влияющим на формирование двухфазного слоя. Приведены энергетические и конструктивные преимущества вымораживающих установок блочного типа. Подтверждено*

превосходство блочного вымораживания с применением ультразвука над другими методами очистки воды.

Abstract: In the world 5000 km³ of fresh water are used every year. This amounts to 11% of the annual runoff of all rivers in the world. More than half of the world's future population will have been affected by severe water shortages by 2050. Such prospects significantly increase the importance of water purification. There is a growing interest in the technologies of block freezing for water cleaning. Systems of this type are characterized by simplicity of design, compactness, and energy efficiency. Due to its principle, block freezing eliminates systemic losses of cold. Since the efficiency of the process directly depends on the quality of its management, there arises a problem of controlling the processes of heat transfer with directional crystallization. In the real world, it is hard to conduct researches of heat transfer process due to its complexity and nonstationarity. That is why theoretical analysis and theoretical models are critically needed. In an ideal thermophysical conditions, the directional crystallization process must take place when the substrate is grown with zero porosity. Any methods of intensification can lead to an increase of the rate of freezing, however it will be accompanied by a porous structure formation. During the crystallization process, temperature, concentration, and porosity of each layer of the substrate are changed, so it is problematic to find an analytic solution to the problem. During the current study, the numerical model of the heat transfer process was obtained. It was found that the porosity of the ice structure has a significant effect on the processes of heat and mass transfer. It was decided to study the process of freezing in the ultrasonic field. The experiments were carried out using an ultrasonic generator. It was found that the optimum temperature was observed when ultrasound has the frequency of 20 kHz. At the higher frequency, the water temperature rises. By solving the equations of material balance, a formula for determining the porosity of the ice block was obtained. Thus, the optimization task is to find the regimes and methods with which the necessary efficacy of ice formation can be achieved. At the same time, acceptable parameters for the density of the ice crystals must be present.

Ключевые слова: моделирование, кристаллизация, пористость, концентрация, температура, теплопередача, перколяция, фракталы.

Keywords: modeling, crystallization, porosity, concentration, temperature, heat transfer, percolation, fractals.

Анализ источников. Ежегодно в мире расходуется 5000 км³ пресной воды, или 11% годового стока всех рек мира. Доступные природные ресурсы пресной воды крайне неравномерно размещены на нашей планете, значительная часть крупнейших рек мира протекает в малонаселенных регионах. В густонаселенных областях относительно немного больших рек, и их воды интенсивно используются. Все это усложняет водоснабжения человечества, на текущий момент примерно одна треть населения Земли испытывает дефицит пресной воды [1].

К 2025 году в связи с ростом численности населения, ситуация существенно ухудшится. Такие перспективы значительно повышают важность очистки воды. До сих пор основным методом очистки воды остается ее дистилляция, однако энергетическая эффективность такого метода не слишком высока. В связи с этим широко распространяются альтернативные способы очистки воды [2,3]. Возрастает интерес к использованию низкотемпературных технологий водоподготовки, и, в частности, к технологиям блочного вымораживания. Для установок этого типа характерны простота конструкции, компактность и энергетическая эффективность. Принцип блочного вымораживания устраняет системные потери холода, которые характерны для традиционных установок криоконцентрирования [4,5].

Формулировка проблемы

Физике процесса опреснения вымораживанием удачно соответствуют установки блочного типа (рис. 1).

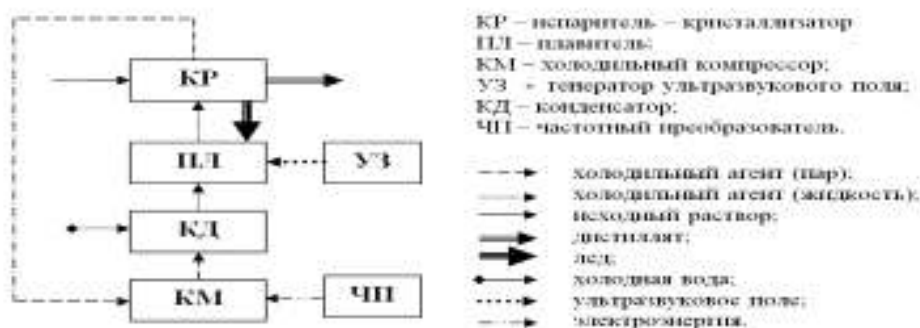


Рис. 1. Аппаратурно-процессовая схема установки блочного вымораживания.

Схема работы выглядит следующим образом. Из раствора на кристаллизаторах формируется блок кристаллов льда, после чего оставшийся раствор удаляется из концентратора. Образовавшийся блок льда отделяется от кристаллизатора и осуществляется гравитационное сепарирование. Непродолжительное оттаивание сопровождается плавлением тонкого поверхностного слоя блока, образовавшаяся при этом вода смывает раствор соли из капиллярных объемов и с поверхности блока. Далее производится расплав льда и получение очищенной воды. Теплота плавления льда используется в холодильном цикле для снижения температуры холодильного агента перед дросселированием. Таким образом, можно обеспечить непрерывный процесс опреснения, процесс легко механизировать, им просто управлять. В качестве охлаждающей среды можно использовать холодильный агент или холодный воздух из окружающей среды [6].

Исходные входные потоки (рис.1) соответствуют параметрам водопроводной воды. На выходе задается допустимая концентрация солей в дистилляте.

Техническая идея схемы состоит в использовании рециклинга льда и частотного преобразователя для регулирования холодильной производительности машины. Система должна эффективно работать как в первом цикле (при запуске установки при отсутствии льда в плавителе), так и в последующих циклах, когда происходит плавление льда. Возврат энергии льда в холодильный цикл может существенно снизить затраты энергии. Но для этого необходимо изменить характеристики компрессора, что предлагается осуществлять с помощью частотного преобразователя. Уменьшение холодильной мощности с помощью регулирующего вентиля является простым и удобным способом, но с энергетической точки зрения этот принцип не эффективен. Использование в схеме частотного преобразователя является более дорогим решением, но позволяет плавно перестраивать холодильную машину на необходимую мощность при максимальной энергетической эффективности. Особенно важно иметь такую возможность в рассматриваемой схеме с рециклингом льда, где следует реагировать на тепловые режимы плавителя.

Поскольку эффективность процесса напрямую зависит от качества управления им, возникает проблема управления процессами теплопередачи при направленной кристаллизации. Исходя из требований энергоэффективности, исследование методик управления процессом теплопередачи при направленной кристаллизации представляет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой. Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей.

Цель работы

В данной работе рассмотрим подходы к аналитическому и экспериментальному моделированию процесса вымораживания, а также возможные принципы влияния на пористость и на процесс вымораживания.

Результаты математического моделирования

При направленной кристаллизации (рис. 2) на горизонтальной поверхности 1, температура которой ниже криоскопической температуры, формируется подложка в виде твердой фазы 2. Ниже растет двухфазный слой 3, состоящий из льда и раствора. Поверхность двухфазной зоны и раствор 5 разделяет пограничный слой 4. Управление процессом направленной кристаллизации основано на обеспечении необходимых условий формирования двухфазного слоя. Разность температур раствора и поверхности 1 определяют плотность теплового потока q и массовый поток льда M_L . Сложность моделирования процессов по схеме (рис.2) обусловлена не только фазовыми переходами, но и изменением по высоте слоя структуры двухфазного слоя. Нельзя игнорировать градиенты температур, концентраций и пористости по высоте слоя. Более того, эпюры этих параметров имеют нелинейный характер. От величины температуры в точке зависит концентрация раствора и пористость, а эти параметры определяют термическое сопротивление, т.е. производительность по росту льда и распределение температур в слое. Таким образом, задача является нелинейной, нестационарной и осложненной фазовыми переходами [7,8].

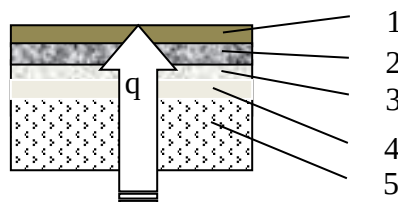


Рис.2. Физическая модель процесса вымораживания.

В идеальном теплофизическом представлении процесс направленной кристаллизации должен проходить при выращивании подложки с нулевой пористостью. Такой консервативный способ управления процессом должен протекать при минимальной разнице температур, практически при криоскопической температуре. Теоретически обеспечится нулевая пористость, однако скорость формирования блока льда будет бесконечно низкой. Любые методы интенсификации приведут к росту скорости кристаллизации, но ценой получения пористой структуры. При расчете установок блочного вымораживания необходимо знание о влиянии пористости на процесс очистки воды. Поэтому экспериментальные исследования пористой структуры представляют большой интерес.

Поскольку найти аналитическое решение проблемы достаточно проблематично, логичным кажется провести численное моделирование процесса кристаллизации.

В процессе кристаллизации температура (t_p), концентрация (X_p) и пористость (ε) каждого среза слоя меняются, в зависимости от толщины слоя (h), поэтому:

$$\lambda_e(h) = \varepsilon(h) \cdot \lambda_p(t, X_p) + (1 - \varepsilon(h)) \cdot \lambda_d(t) \quad (1)$$

Используя формулу (1) и учитывая, что значение ε изменяется по линейному закону, получим семейство графиков, представленное на рисунке 3.

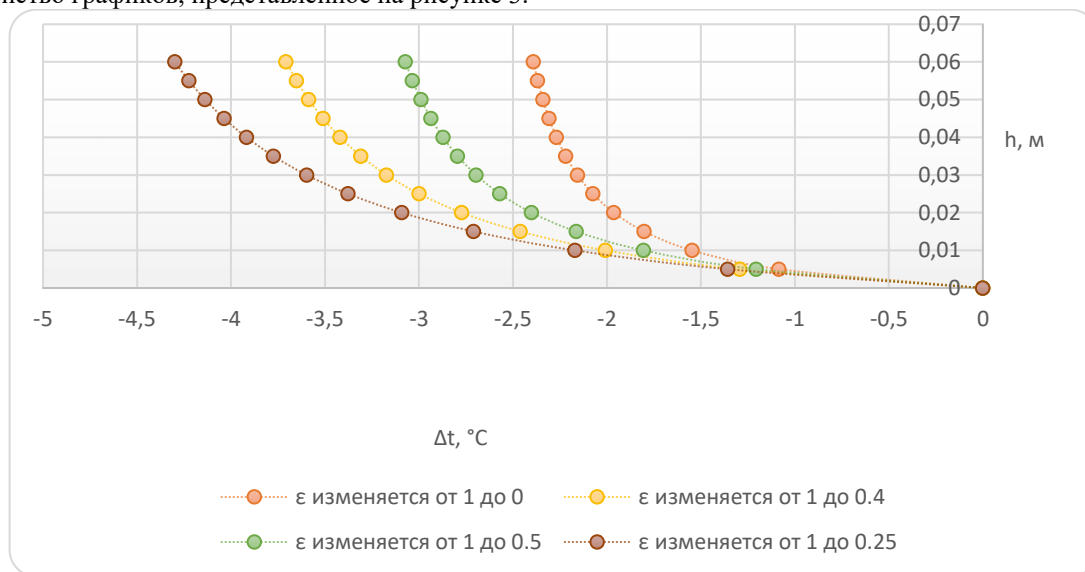


Рис. 3. Графики изменения температуры по высоте канала.

По приведенным графикам можно сделать вывод, что возможность эффективного воздействия на процесс кристаллизации во многом определяется достоверностью представлений о строении пористой структуры льда, поэтому актуальной является задача моделирования этой структуры и определение ее влияния на процессы тепло- и массообмена. Как показывает обзор литературы, эта проблема еще не решена в полной мере, потому было принято решение провести экспериментальное моделирование процесса вымораживания воды.

Предполагается организация локального воздействия ультразвуковым генератором на поверхность фазового контакта «лед-вода», что позволит осуществлять формирование блока льда с плотной упаковкой кристаллов, а на стадии сепарирования — более эффективную эвакуацию растворов из пористого объема блока льда. Блок льда — это своеобразная система с порами (капиллярами), при воздействии ультразвука молекулы незамерзшего солевого раствора расшатываются, и облегчается их выход из пористой структуры блока, это теоретически позволяет значительно сократить время сепарирования.

Исходя из результатов математического моделирования, пористость оказывает значительное воздействие на тепло- и массообмен в процессах кристаллизации и сепарирования. В работе формулируется гипотеза, что организация процессов кристаллизации в условиях воздействия ультразвукового поля будет способствовать более плотной упаковке кристаллов льда в блоке, а, следовательно, к уменьшению пористости. Это станет предпосылкой для более качественного разделения раствора.

Результаты экспериментальных исследований. С помощью блочной вымораживающей установки с ультразвуковым генератором был проведен ряд опытов исследующих влияние мощности, частоты и положения ультразвукового излучателя на процесс блочного вымораживания (рис. 4,5).

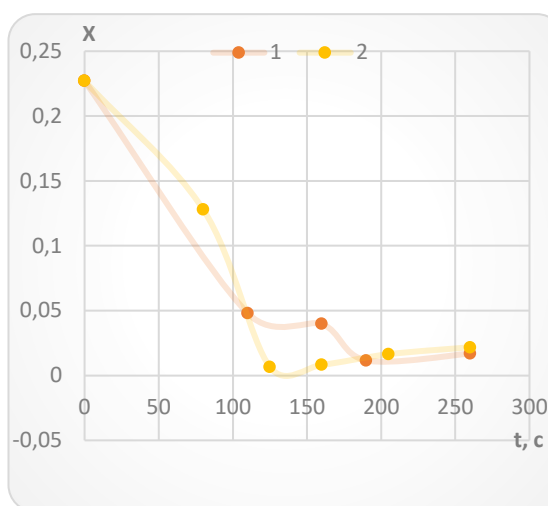


Рис. 4. Влияние ультразвука на солесодержание в стоках: 1 – без ультразвука, 2 – с применением ультразвука.

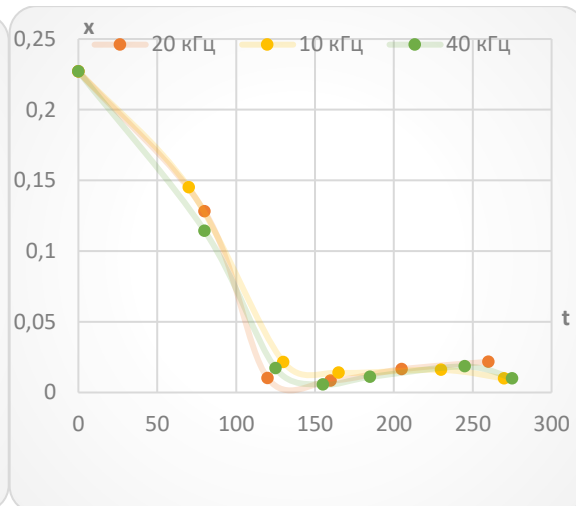


Рис. 5. Влияние ультразвука разной частоты на солесодержание в стоках.

Для исследования влияния ультразвука на процессы кристаллизации и сепарирования был применен генератор ультразвуковых волн с переменной частотой (рис. 5, 6). Установлено, что минимальный прирост температуры наблюдается при влиянии ультразвука частотой 20 кГц. При более высокой частоте температура воды повышается, что ухудшает результаты в рамках решения задач вымораживания.

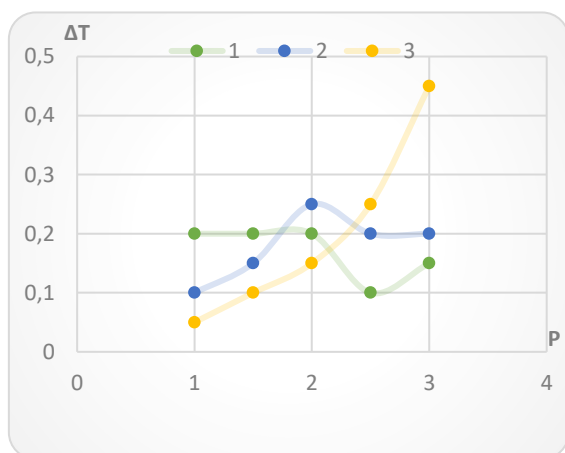


Рис. 6. Зависимость прироста температуры от мощности при разной частоте ультразвука: 1 – 6 кГц, 2 – 10 кГц, 3 – 20 кГц.

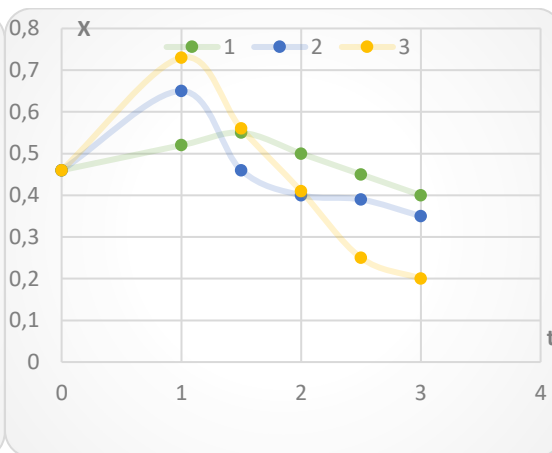


Рис. 7. Влияние времени кристаллизации на солесодержание в стоках: 1 – 30 минут, 2 – 1 час, 3 – 2 часа.

Опытным путем было установлено, что наилучший результат дал эксперимент с применением генератора частотой 20 кГц и длительностью кристаллизации 2 часа. Далее эксперименты проводились при различном месторасположении самого интенсификатора. Установлено, что наибольший эффект на процессы кристаллизации и сепарирования оказал генератор с частотой ультразвука 20 кГц, расположенный в центре на расстоянии 1 см от блока льда с кольцом-ограничителем (рис. 8).

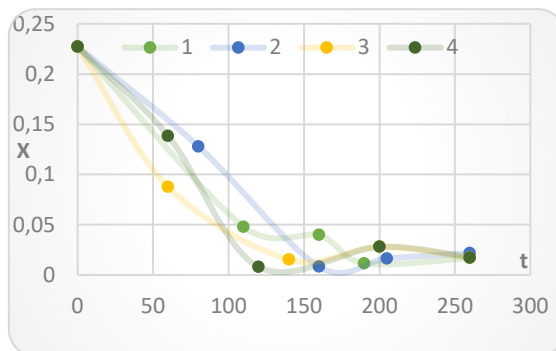


Рис. 8. Зависимость количества соли в объеме раствора от времени с применением ультразвука частотой 20 кГц при различном расположении относительно блока льда: 1 – сбоку; 2 – вплотную; 3 – центр на расстоянии 1 см; 4 – центр на расстоянии 1 см с кольцом-ограничителем.



Рис. 9. Влияние ультразвукового интенсификатора на изменение концентрации соли в блоке льда с течением времени.

Путем решения уравнений материального баланса получена формула для нахождения концентрации соли в блоке льда, где M_n – начальная масса раствора с концентрацией солей X_n , $M(\tau)$ – текущая масса раствора с концентрацией солей $X(\tau)$:

$$X(\tau) = \frac{M_n X_n - M(\tau) X(\tau)}{M_n - M(\tau)} \quad (2)$$

Проведены опыты по определению концентрации солей в блоке льда с применением ультразвукового интенсификатора и без. Полученные графики (рис. 9) свидетельствуют, что применение ультразвука снижает концентрацию солей в блоке льда, а, следовательно, и его пористость. Исходя из результатов опытов, можно сделать вывод, что применение ультразвуковых интенсификаторов в установках блочного вымораживания позволяет улучшить параметры блока льда и увеличить энергетическую эффективность процесса.

Выводы

1. Установлено, что пористость структуры льда оказывает значительное влияние на процессы тепло- и массообмена при формировании блока льда.
2. Разработана и проанализирована математическая модель влияния пористости блока льда на теплофизические процессы.
3. Результаты исследований показали, что наибольший эффект на процессы интенсификации и сепарирования оказал генератор с частотой ультразвука 20 кГц, расположенный в центре на расстоянии 1 см от блока льда с кольцом-ограничителем.
4. Применение ультразвука в процессе кристаллизации и сепарирования блока льда снижает количество солей в блоке и повышает энергетическую эффективность работы установки блочного вымораживания.

Литература

1. Хвесик М. А. Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього / М. А. Хвесик, В. М. Мандзик. // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – №1. – С. 2–8.
2. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды / Б. Е. Рябчиков. – Минск, 2005.
3. Бурдо О. Г. Анализ процессов деминерализации воды / О. Г. Бурдо, О. О. Офатенко. // 36. наук. праць ОНАХТ. – 2009. – №35. – С. 287–292.
4. Бурдо О. Г. Холодильные технологии в системе АПК / О. Г. Бурдо. – Одесса: Полиграф, 2009. – 288с.
5. Антипов С. Т. Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, В. Ю. Овсянников. – Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.

6. Техника блочного вымораживания / О. Г. Бурдо, С. И. Милинчук, В. П. Мордынский, Д. А. Харенко. – Одесса: Полиграф, 2011. – 294 с.
7. Бурдо О. Г. Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2014. – С. 80–86.
8. Бурдо О. Г. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Харчова наука і технологія. – 2015. – С. 75–80.

УДК 637.146

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ МОРСКОЙ ВОДЫ В АППАРАТАХ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Тришин Ф.А., к.т.н, Масельская Я.А., магистрант факультета ЭТОиТД, ОНАПТ
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

ENERGY ASPECTS OF THE PROCESS OF THE SEA WATER DEMINERALIZATION IN BLOCK DUMMY EQUIPMENT APPARATUS

Trishin F.A., P.h.D., Maselskaya Ya.A., master's degree of the faculty of ETEandTD
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

Аннотация. Проведен анализ литературных источников по проблеме пресной воды. Анализируется проблема с пресной водой в Украине. Показаны преимущества низкотемпературных методов опреснения. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения опресненной морской воды.

Annotation. The analysis of literature sources in the field of fresh water problems is carried out. The problem with fresh water in Ukraine is analyzed. The advantages of low-temperature desalination methods are shown. Prospects of block freezing technologies for obtaining desalinated sea water are substantiated.

Ключевые слова: морская вода, деминерализация морской воды, низкотемпературные методы опреснения морской воды, технологии блочного вымораживания.

Key words: sea water, demineralization of sea water, low-temperature methods of seawater desalination, technologies of block freezing.

Введение. Глобальной проблемой человечества в новом тысячелетии становится задача получения пригодной для питья пресной воды. Дефицит пресной воды остро ощущается на территории более 40 стран, расположенных в засушливых областях земного шара и составляющих около 60% всей поверхности суши. Мировое потребление воды в начале XXI века достигло $120-150 \cdot 10^9$ м³ в год. Растущий мировой дефицит пресной воды может быть скомпенсирован опреснением солёных (солеосодержание более 10 г/л) и солоноватых (2-10 г/л) океанических, морских и подземных вод, запасы которых составляют 98% всей воды на земном шаре.

Пресная вода является ценной составной частью морской воды. Нехватка пресной воды все больше ощущается в индустриально развитых странах, как США и Япония, где потребность в пресной воде для бытовых нужд, сельского хозяйства и промышленности превышает имеющиеся запасы. В таких странах, как Израиль или Кувейт, где уровень осадков очень низок, запасы пресной воды не соответствуют потребностям в ней, которые возрастают в связи с модернизацией хозяйства и приростом населения. В дальнейшем человечество окажется перед необходимостью рассматривать океаны как альтернативный источник воды [1].

По запасам питьевой воды Украина занимает последнее место в Европе и 70-е в мире по ее качеству. Вода – одна из наиболее важных составных частей живых организмов, поэтому проблему неудовлетворенного качества питьевой воды необходимо решать незамедлительно. Непрерывная интенсификация промышленного производства обуславливает рост дефицита пресной воды. В связи с отсутствием в мировой практике эффективных и экономичных опреснителей воды, указанная проблема приобретает все большую актуальность [2].

Актуальность исследований. Проблема питьевой воды в Украине – общенациональная. Количество и качество воды из водопровода является сутью этой проблемы. Плохое состояние водных объектов – одна из основных причин низкого качества водопроводной воды.

Сегодня альтернативу водопроводной воде составляет бутилированная очищенная вода.

Экологами признано непригодными для питья на Украине более 60% украинской воды.

Водные запасы Украины крайне невелики. Среднегодовая водообеспеченность одного жителя Украины сегодня составляет приблизительно 1 тыс. м³, что в 15 раз ниже нормы, которая определена Европейской

экономической комиссией ООН. Кроме того, имея ограниченные запасы пресной воды, Украина, практически не имеет поверхностных вод, которые отвечали бы требованиям стандартов, предъявляемым к источникам питьевого водоснабжения.

В среднем, на одного гражданина Украины приходится до 1010 м³/год, когда обеспеченность водными ресурсами в Европейских странах составляет: Швеция - 24000 м³/год; Австрия - 7700 м³/год; Швейцария - 7280 м³/год; Франция - 4570 м³/год. Луганская область является наиболее вододефицитным регионом в Украине, где водный баланс на одного жителя составляет, в зависимости от водности года - 160-500 м³/год.

По данным Министерства охраны здоровья Украины процент проб воды, не соответствующей санитарно-химическим и бактериологическим показателям, составил:

- по Донецкой области от 8 до 11,4%;
- по Луганской области 20-27%;
- по Харьковской области 11,4-15%;
- по Запорожской области 11,4-15%.

В развитых странах воду из-под крана можно пить без кипячения и даже без фильтрации. В Европе вода проходит сложную и дорогостоящую очистку: многослойными фильтрами, озоном, ультрафиолетом. Отфильтровываются железо, марганец и другие вредные вещества и соединения, доводятся до нормы значения pH, уровень жесткости. А чтобы вода такой же чистой дошла до потребителя, водопроводные трубы делают из материалов не подверженных коррозии (керамика, медь, пластик).

В Украине ситуация «несколько» иная. До сих пор хлорирование остается самым оптимальным вариантом обеззараживания воды.

Хлорирование воды, содержащей большие количества органических веществ, приводит к образованию хлорорганических соединений (ХОС), опасных для здоровья человека, вызывающих снижение иммунитета, anomalies развития, могут повышать вероятность развития злокачественных новообразований.

Анализ литературных источников и формулировка проблемы. Физическая энергия, необходимая для превращения 1 кг воды в лед составляет 0,33 МДж, а при превращении воды в пар - 2,5 МДж. Для снижения затрат энергии на процесс выпаривания на предприятиях используют многоступенчатые выпарные установки, в которых утилизируется энергия вторичного пара. Так, вторичный пар из аппарата первой ступени используется как греющий в аппарате второй ступени. Аналогичная схема в последующих аппаратах. В настоящее время экономически обоснованным в Европе считается применение 7-ступенчатых установок.

В Украине число ступеней при выпарке не превышает трех.

Проведем сравнение технологий низкотемпературного разделения растворов с наиболее энергетически эффективной 7- ступенчатой выпарной установкой.

Низкотемпературные технологии разделения пищевых жидкостей 1 поколения (КТ1), которые получили распространение в Европе, выбрали все свои резервы к 1990г. Предложенные в ОНАПТ аппараты блочного вымораживания относятся криотехнологиям 2 поколения (КТ2, КТ3, КТ4). Аппараты КТ4 требуют в 5 раз меньших энергетических затрат чем у 7 – ступенчатых вакуум-выпарных установок.

Таблица 1 - Энергетические аспекты развития низкотемпературных технологий разделения растворов [3].

	Характеристика	J, МДж/кг
КТ1	Системы вымораживания с машинным принципом получения кристаллов льда, с сепараторами в виде центрифуг, прессов либо промывочных колонн. Наличие насосов, емкостей, трубопроводов приводит к значительным системным потерям холода. Конструкции 1 поколения. Резервы по снижению энергоемкости исчерпаны	1,1
КТ2	Системы вымораживания с аппаратным принципом получения кристаллов льда, с гравитационным принципом сепарирования. Отсутствуют системные потери холода. Аппараты 2 поколения.	0,7
КТ3	Аппараты 2 поколения. Используют техническую идею рециклинга льда для переохлаждения холодильного агента перед дросселированием.	0,4
КТ4	В аппаратах применяется частотный принцип регулирования холодопроизводительности компрессора, что позволило перестраивать структуру холодильной машины в процессе кристаллизации воды. Аппараты 2 поколения.	0,21

Снижение уровня энергетических затрат при блочном вымораживании достигается за счет:

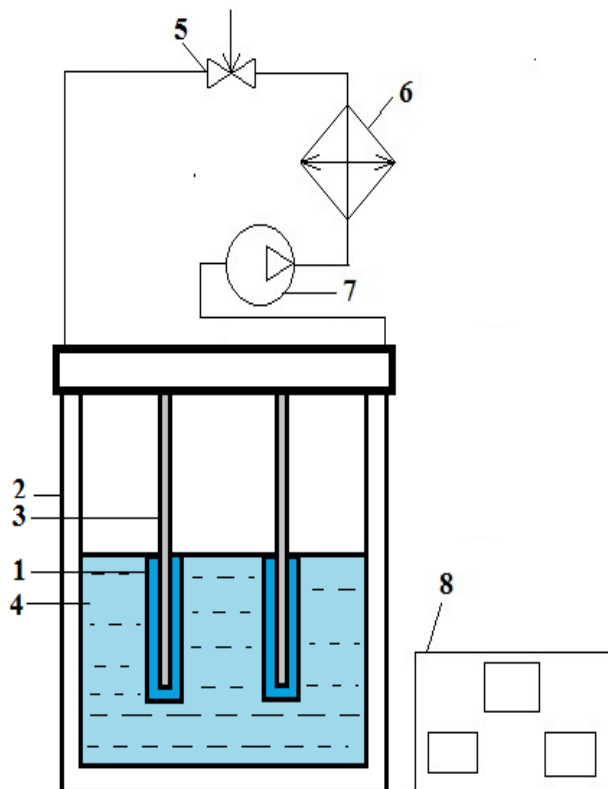
1. - сокращения расхода холода из-за отсутствия циркуляционных контуров и механизмов;

3. - использования в холодильном цикле энергии плавления блоков льда.

Формулировка цели работы и задачи исследований. Целью данной работы является опреснение морской воды при помощи установки блочного вымораживания. Задача исследований состоит в получении кинетики кристаллизации воды, динамики роста блока льда, исследование процесса сепарирования.

На первом этапе было проведено 2 этапа фильтрации морской воды. Далее чистую воду поместили в емкость для замораживания и включили установку. После чего каждый час фиксировали показатели содержания воды, объем и высоту воды в емкости, толщину блока льда, температуры воды и хладагента.

Этап опреснения морской воды проводился на установке блочного вымораживания.



- 1 - лед; 2 - концентратор; 3 - кристаллизатор; 4 - продукт; 5 - дроссельный вентиль 6 - конденсатор; 7 - компрессор; 8 - измерительные приборы.

Рис. 1. Схема опытно-промышленного криоконцентратора

В ходе выполнения исследований были получены и построены такие зависимости от времени как: кинетика формирования блока льда, процесс кристаллизации воды, концентрация солей как в блоке льда так и в воде.

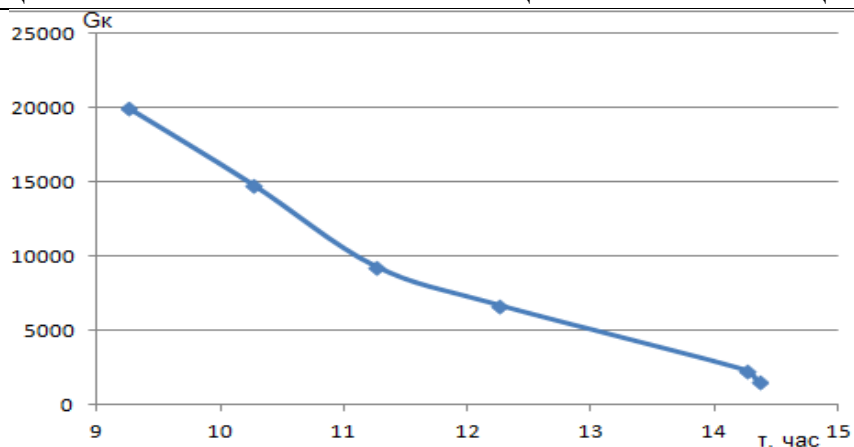


Рис. 2. Кинетика изменения массы раствора

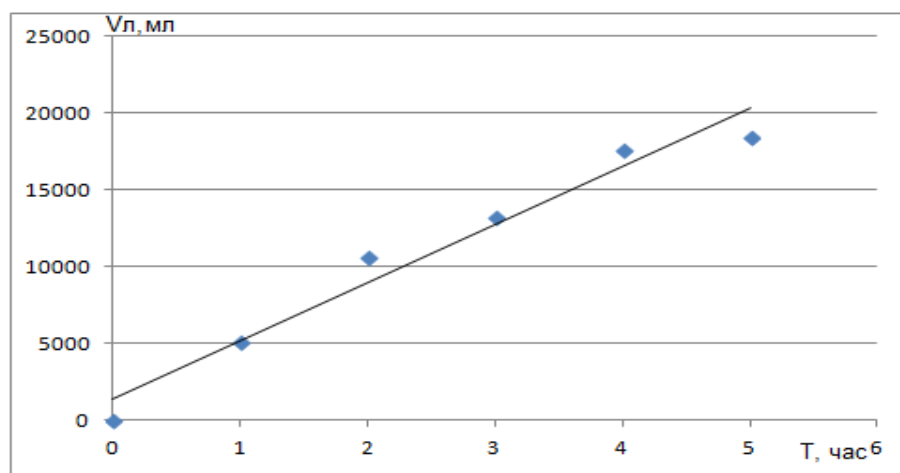


Рис. 3. Кинетика формирования блока льда

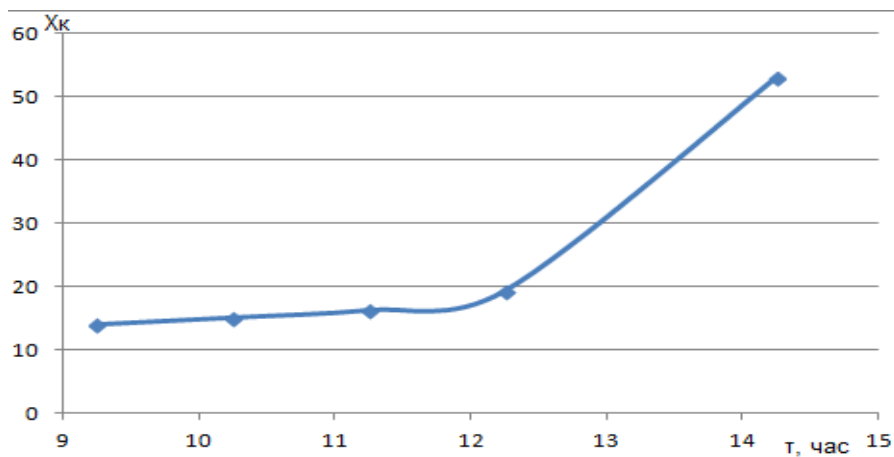


Рис. 4. Концентрация солей в растворе

По балансовой модели процесса блочного вымораживания, где на вход кристаллизатора подается морская вода с начальной концентрацией X_n и массовым расходом G_n (рис.5), можно аналитически определить содержание солей в блоке льда (рис. 6)

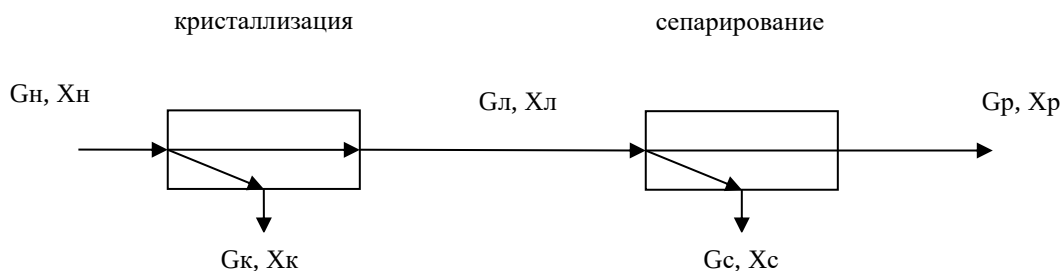


Рис. 5. Схема материальных потоков

Для процесса кристаллизации:

$$\left. \begin{aligned} G_k + G_l &= G_n \\ G_k X_k + G_l X_l &= G_n X_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из системы уравнений 1 можно определить концентрацию солей в блоке льда:

$$X_l = \frac{G_c X_c - G_k X_k}{G_l} \quad (2)$$

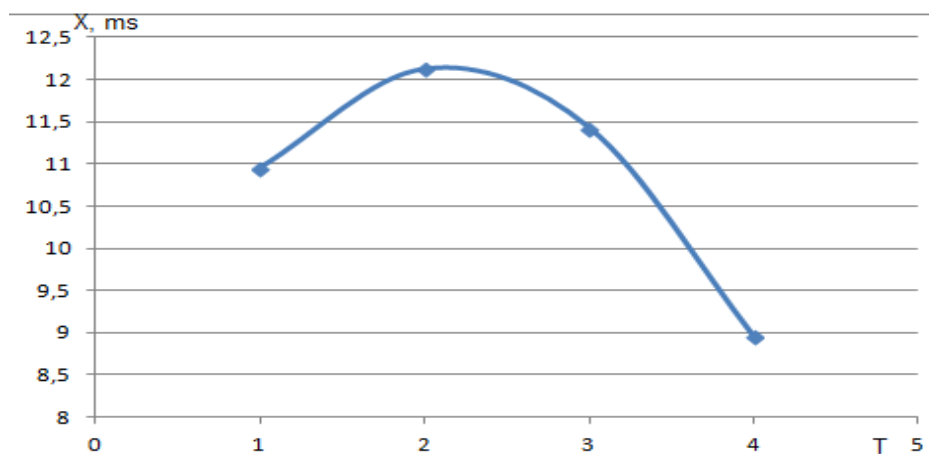


Рис. 6 - Концентрация солей в блоке льда

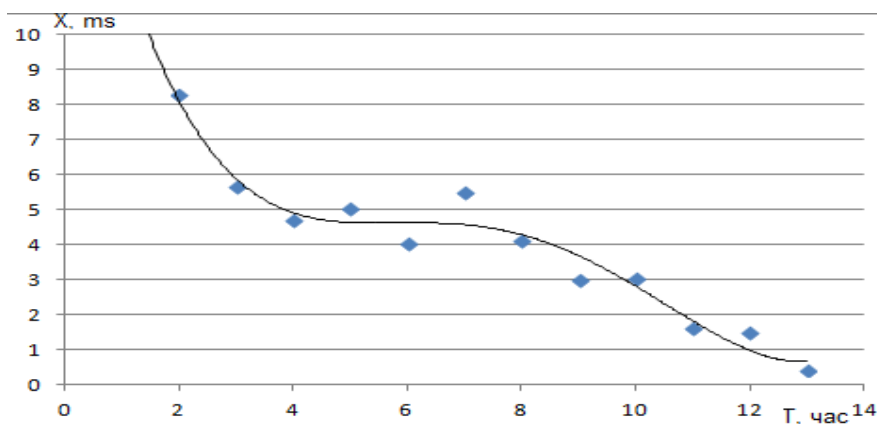


Рис. 7 - Солесодержание стоков

Анализ результатов исследований. На рисунке 2 представлена зависимость $G_k(\tau)$ которая показывает интенсивность вымораживания воды в зависимости от времени в установке блочного вымораживания.

Рисунок 3 представляет быстроту формирования блока льда. Можно заметить, что в начале времени процесс протекает более интенсивно, чем в конце эксперимента. Снижение темпов роста толщины блока льда и, следовательно, массы льда свидетельствует о том, что величина холодильной мощности со временем снижается. Поэтому, энергетически эффективные системы блочного вымораживания должны учитывать эту специфику.

В зависимости от времени изменяется и концентрация солей в морской воде, рисунок 4 показывает как растет концентрация солей в воде. Это объясняется тем, что происходит процесс концентрирования, то есть формируется блок чистой опресненной воды, концентрация солей, в котором уменьшается, что и представлено на рисунке 6.

После выключения установки, сформировавшийся блок льда оставили для оттаивания и продолжали каждый час измерять солесодержания в стоках. На рисунке 7 можно заметить что изначальное солесодержание было 8,28 ms, а к концу процесса оттаивания льда – 0,42 ms. Это значение говорит о том, что из морской воды была получена довольно чистая опресненная вода.

Вывод. Снижение уровня энергетических затрат при блочном вымораживании достигается за счет:

- Сокращения расхода холода из-за отсутствия циркуляционных контуров и механизмов;
- Применения гравитационного сепарирования, что стало возможным при формировании блока льда на стадии кристаллизации, а не сепарирования;
- Использования в холодильном цикле энергии плавления блоков льда

Использование теплоты плавления блоков льда в блочных криоконцентраторах позволяет снизить уровень энергопотребления до 0,08 кВтч на 1 кг льда, что соответствует $J=0,3$ МДж/кг. Это в 10 раз меньше чем в одноступенчатых и в три раза меньше чем в пятиступенчатых выпарных установках [3].

Литература.

1. Мосин О.В. Физико-химические основы опреснения морской воды – Москва: ООО «Фолиум», 2012, № 1, с. 19-30.
2. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288 с.
3. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294 с.
4. Drioli E., Giorno L (eds.) Comprehensive membrane science and engineering. Volume 1 : Basic Aspects Of Membrane Science And Engineering. First edition. - Elsevier, 2010. - 368 p. - ISBN: 978-0-444-53204-6.
5. Masciangioli, T.M., Wood-Black, F. (Norling, P. (Eds.), 2004. Water and Sustainable Development: Opportunities for the Chemical Sciences. Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable. National Academies Press.
6. Australian Government National Water Commission, 2005

УДК 504:628.1

ОЦІНЮВАННЯ БЕЗРЕАГЕНТНОЇ ОБРОБКИ ВОДИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Журавська Н.Е., доц., к.т.н.

Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ

EVALUATION NONCHEMICAL WATER TREATMENT IN HEATING SYSTEMS

N.E. Zhuravska, associate professor, Ph.D.

Kiev National University of Construction and Architecture, Kyiv

Анотація: При безреагентній обробці води в електромагнітних полях для систем теплопостачання здійснювалось еколого-техногенне оцінювання процесу. Отримані результати дозволили встановити структурно-функціональні взаємозв'язки та взаємодії між складовими системи теплопостачання.

Abstract: In nonchemical water treatment in electromagnetic fields for heating systems carried out environmental and technogenic evaluation process. The results revealed structural and functional relationship and interaction between the components of heating system.

Ключеві слова: безреагентна обробка води.

Keywords: nonchemical water treatment.

Вступ

Сучасним напрямком підготовки технічної води в системах теплопостачання є методи безреагентної обробки води із застосуванням електромагнітних полів [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Переваги цієї технології перед традиційними способами полягають в тому, що особливості технології обробки води дозволяють отримати позитивні технологічні результати (попередження або видалення накіпів та біобластів із трубопроводів) та

забезпечити економію теплової енергії та зменшення витрат води [8, 9].

В практичних умовах еколого-техногенні параметри систем теплопостачання впорядковують її управління, коли йдеться мова про взаємодію їх структури омагніченої води із негативними техногенними впливами (накіп, біообрастання).

Саме дослідження механізмів хімічної термодинаміки та їх узгодженість із основопологаючими законами екології в системі «техногенні впливи – наслідки впливів» стало предметом наукових досліджень, частина яких представлена у даній публікації.

Методологія досліджень та обговорення результатів

Для наглядності поняття механізму структурно-функціональних зв'язків зазначеної системи теплопостачання, що зумовлюють результативність безреагентної обробки води (БОВ) в електромагнітних полях досягається енергоефективною системою теплопостачання з підвищення екологічними властивостями, рис.1 [10].

Динаміка змін технології обробки води була досліджена попередньо, на лабораторному стенді за довготривалий період, а у подальшому вже в системі теплопостачання [10].

Технологія обробки води здійснювалася у такий послідовності:

- 1) водопровідна вода оброблялася у 2^х – камерному пристрої з паралельними електродами у полі постійного електричного струму за умов зміни в автоматичному режимі знаків електродів в камерах та напрямку води в них;
- 2) внаслідок різниці потенціалів електричного струму між електродами (2,5...3В) відбувається завдяки електролізу пом'якшення води і часткова коагуляція деяких елементів в ній;
- 3) очищення води від осадів та пом'якшення до $pH \leq 6,0$ в апараті для омагнічення води в височастотному електромагнітному полі з ізольованими електродами із частотою коливань $1...X$ кГц;
- 4) у воді між електродами виникає індукція магнітного поля, що призводить до руйнування кластерних та міжкластерних водневих зв'язків і вона перетворюється в активну мономолекулярну рідину з не дипольними, а позитивно зарядженими іонами;
- 5) далі у ємність, куди надійшла БОВ у електромагнітному полі подають певну кількість біоцидної добавки;
- 6) БОВ надходить в диспергатор-змішувач обертово-вібраційного типу, а потім по трубопроводах диспергований та гомогенізований розчин з омагніченою водою надходить в систему для використання.

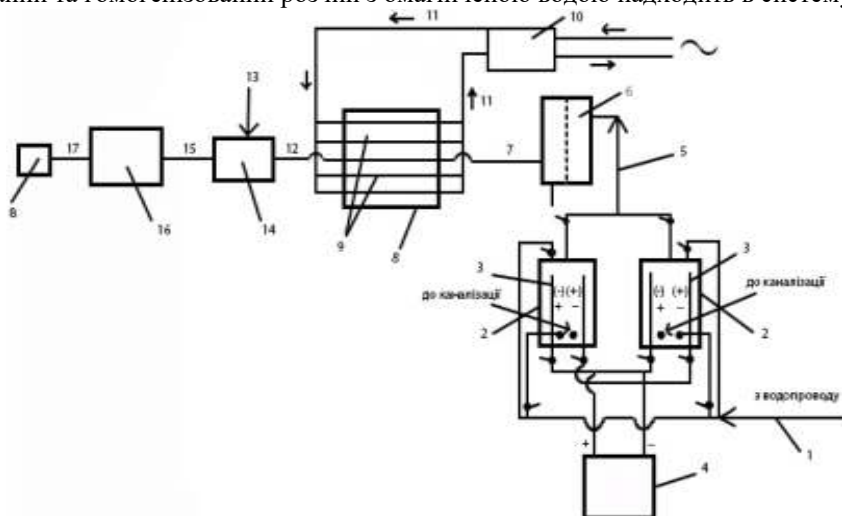


Рис. 1. Енергоефективна система теплопостачання з підвищення екологічними властивостями

Таким чином доведено, що в результаті магнітної обробки води вона перетворюється в мономолекулярну систему, тобто стає електролітом. Виникнення подвійного електричного шару відповідає принципом моделі Штерна, коли у воді, за рахунок адсорбованих іонів на поверхності металу, збільшується енергія зв'язку розчину з поверхню адсорбованого шару і зменшується відстань контакту з поверхнею у порівнянні з подвійним електричним шаром неомагніченої води. Електрохімічні перетворення створюють можливість руху омагніченої води в тих мікрокапілярах, де неомагнічена вода не може рухатися. Слід зазначити, що отримані результати дозволяють констатувати щодо доцільності БОВ в електромагнітному полі. Такий висновок базується на стабільності і високо ефективності запропонованої технології води.

При структурно-функціональній взаємодії між складовими БОВ нами вперше встановлено структурно-об'єднуючу роль еколого-техногенних факторів (взаємозв'язок).

Побудови такої програми-схеми подальших досліджень стала необхідністю для розкриття поняття

екологічність запропонованої системи БОВ в електромагнітних полях.

Нами запропоновано наукова гіпотеза, що негативний заряд метала перешкоджає подальшому переходу іонів метала в розчин води і викликає міжйонну взаємодію процесів переходу катіонів в метал (перешкода для утворення електролітів з мономолекулярною системою з позитивно зарядженими іонами). Тобто, технологічна ефективність запропонованої системи теплопостачання неможлива без регулювання еколого-техногенних ситуацій при застосуванні БОВ внаслідок того, що небажані структурно-функціональні взаємодії порушують ці процеси.

Основою розробки програми стали такі еколого-техногенні підходи:

- принципи системного підходу, які дає змогу охарактеризувати структурно-функціональні взаємозв'язки між складовими метода БОВ;
- принцип оптимізації технології БОВ за рахунок узгодженості наукового механізму фізичної обробки води з певними законами загальної екології;
- принцип збереження саморегуляції систем теплопостачання (технічна та функціональна надійність БОВ);
- принцип забезпечення збалансованого протікання технологічних процесів в системі «техногенний вплив – наслідок впливу»;
- принцип економічності БОВ в електромагнітних полях;
- принцип потенційно-екологічних ризиків технології БОВ (перспективи).

Аналіз структурних складових програм схеми засвідчують, що вони у повному обсязі відповідають тактичним науковим принципам стосовно вирішенню стратегічного напрямку отримання високоефективної, екологічної технології БОВ в електромагнітних полях.

Висновки

1. Показано, що технологічна ефективність безреагентної обробки води в електромагнітних полях для систем теплопостачання неможливо без регулювання еколого-техногенних ситуацій (накіль, біообрастання, добавка біоцидів, домішок), які безпосередньо впливають на сам виробничий процес.
2. Запропонована програма-схема здійснення дослідницьких робіт сприяє з'ясуванню механізму структурно-функціональних взаємозв'язків і взаємодії в системі теплопостачання, що дозволяє при необхідності корегування БОВ з метою виключення технологічних ризиків і реалізації на зараз і перспективу.
3. Засвідчено, що структурно-функціональні складові (блоки) програми взаємопов'язані між собою та виконують еколого-техногенну об'єднуючу роль.
4. Показано, що дієвість програми, внаслідок її засадничих наукових принципів забезпечує стабільність експлуатації БОВ в електромагнітних полях для систем теплопостачання.

Література

1. А.с. 2048451, Кл. С 02 F 1/48. Омагничивающее устройство / Клевещ Н.И., Гриднев А.И., №4950147/26; заявлено 06.05.91; опубл. 20.11.95. Бюл. № 32.
2. Гурницький, В.Н. Итоги исследования аппарата магнитной обработки воды за 2001 г. / В.Н. Гурницький, Г.В. Никитенко, И.В. Атанов, С.Н. Антонов // Сб. научн. тр.: Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в с.-х.- СГСХА, 2002 г. - с. 73.
3. Драганов, Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б.Х. Драганов. - М.: Агропромиздат, 1990. - 463 с.
4. Кузьменко, А.Г., Грачев В.Г., Солодовник Ф.С. Электромагнитные механизмы металлургических машин / А.Г. Кузьменко, В.Г. Грачев, Ф.С. Солодовник. - М.: Металлургия, 1996. - 508 с.
5. Фисенко, В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов / В.Г. Фисенко. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - 44 с.
6. Патент на корисну модель: № 100236 / Система обробки води в електромагнітних полях // Малкін Е.С., Фуртат І.Е., Журавська Н.Е., Коваленко Н.О. - Бюл. 10.07.2015.
7. Малкін, Е.С. Перспективи створення ресурсозберігаючих технологій шляхом магнітної обробки води та водних розчинів [Текст] / Е.С. Малкін, І.Е. Фуртат, Н.Є. Журавська, В.П. Усачов // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: НТЗ. – Вип.17 [під ред. Е.С. Малкіна] – К.: КНУБА, 2014. - С. 120- 127.
8. Малкін, Е.С. До питання приготування та використання омагніченої води / Е.С. Малкін, Н.Є. Журавська, Л.П. Мележик // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Вип.1(69). - Рівно: НУВГП, 2015. – С. 66-72.
9. Журавська, Н.Є. Енергоресурсозберігаючі технології / Н.Є. Журавська // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. В.30. - Рівне: НУВГП, 2015. – С. 19-28.
10. Малкін, Е.С. Процес обробки води в магнітних полях / Е.С. Малкін, Н.Є. Журавська, Н.О. Коваленко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: НТЗ. – Вип. 18 [відп. ред. Е.С. Малкіна] – К.: КНУБА, 2015. - С. 70-74.

СПОСОБИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВОЛОГОВИДАЛЕННЯ ПРИ ЗНЕВОДНЕННІ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

Снєжкін Ю.Ф., д.т.н., професор, чл. – кор. НАН України,

Гусарова О.В., Шапар Р.О., к.т.н., с.н.с.

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

WAYS OF WATER DISCHARGE INTENSIFICATION IN FROZEN FATHROOM

Snezhkin Yu.F., Husarova O.V., Shapar R.O.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

Анотація: У статті дано визначення фруктово-овочевих чипсів, зазначено основні способи зневоднення, які використовуються в світі для отримання чипсів, наведені недоліки технологій їх виробництва. Представлені вимоги до сировини при виробництві фруктово-овочевих чипсів, наведені оптимальні значення цукрово-кислотного індексу для фруктів. Об'єктами досліджень були яблука, груші, айва, хурма і білі коренеплоди. У статті також наведено аналіз різних способів попередньої обробки фруктової сировини перед сушінням (паротермічна обробка, обробка в розчинах лимонної кислоти і цукровому сиропі). Отримані результати використані при розробці енергоефективної теплотехнології виробництва фруктово-овочевих чипсів з використанням конвективно-конденсаційного методу сушіння, розроблені і затверджені технічні умови "Чипси фруктові, овочеві". Теплотехнологія захищена 9 патентами України. Розроблена теплотехнологія дозволяє інтенсифікувати вологовидалення та підвищує енергоефективність процесу зневоднення на 10...15 %.

Abstract: A new form of dried products for Ukrainian consumers is fruit and vegetable crisps. Fruit or vegetable crisps are thin lamina of fruits or vegetables obtained without frying. Fruit or vegetable crisps obtained by drying to low residual moisture. Their characteristic is the lack in the composition of cholesterol, carcinogens and more.

Scientific development technologies drying crisps involved in many countries (Korea, Poland, Hungary, Russia and Belarus), but Ukraine does not pay enough attention to such studies.

The article describes the basic methods of drying that are used in the world for the production crisps. The main disadvantages of the methods for producing crisps are also indicated.

The requirements for raw materials for the production of fruit and vegetable crisps are presented; the optimal values of the sugar-acid index for fruit are given. Experimentally that the optimum size of a sugar-acid index, for apples is 16...20, and for pears is 50...70.

Objects of research were apples, pears, quince, persimmon and white roots. The article also analyzes various methods of preliminary processing of raw materials before drying (steam treatment, treatment in solutions of citric acid and sugar syrup). Analysis of modes and methods of pretreatment of raw materials on drying kinetics and the organoleptic finished product showed that examined treatments provide a high degree of color preservation of raw materials and accelerating the kinetics compared to untreated samples.

Steam treatment shortens the drying process by 20...30 % than the raw fruit dehydration. Steam treatment stabilizes color and taste range of source material. Steam treatment helps preserve vitamins and helps destruction of oxidative enzymes. For white roots, which contain flavorings and essential oils steam processing is not performed.

The obtained results were used in the development of energy-efficient technology for the production of fruit and vegetable crisps using the convection-condensation drying method, and the technical specifications of "Crisps fruit and vegetable" were developed and approved. Technology is protected by 9 patents of Ukraine. The developed technology increases the energy efficiency of the process by 10...15 %.

Ключові слова: фруктово-овочеві чипси, вологовидалення, теплотехнології, цукрово-кислотний індекс, конвективно-конденсаційний метод сушіння сировини, енергоефективність процесу.

Keywords: fruit and vegetable crisps, moisture removal, innovative technologies, sugar-acid index,

convective and condensation drying, energy efficiency of process.

Вступ. Як відомо, термін зберігання свіжої харчової сировини рослинного походження невеликий. Ферментативні, мікробіологічні та біохімічні зміни призводять до псування сировини досить швидко і при зберіганні їх втрати можуть досягати 40...50 %.

Одним з найбільш ефективних методів збереження свіжої харчової сировини є сушіння. Сушена продукція не потребує великих площ для зберігання та транспортування, в ній збережені корисні речовини, вона має довготривалий термін зберігання.

Новою формою сушеної продукції для українського споживача є фруктово-овочеві чипси. Фруктові або овочеві чипси – це тонкі пластинки фруктів чи овочів отримані без обсмаження, сушінням до низької залишкової вологості, тому їх характерною відзнакою є відсутність у складі холестерину, канцерогенів тощо. Вони ароматні, смачні та, що дуже важливо, – натуральні. Завдяки цьому чипси набувають популярності та попиту.

Процес термічного зневоднення є основним у технологічному циклі отримання фруктових чипсів і визначає якість готового продукту та енергетичні показники виробництва.

Формулювання проблеми та аналіз останніх досліджень.

Аналіз доступних літературних та Інтернет джерел показав, що існує значна кількість технологій для виробництва фруктово-овочевих чипсів. Науковими розробками технологій сушіння чипсів займаються у багатьох країнах світу (Кореї, Польщі, Угорщині, Росії та Білорусії) [1 – 4], проте в Україні не приділяють достатньої уваги подібним дослідженням.

У виробництві чипсів використовують різні способи зневоднення – сублімаційний, вакуумний, конвективний, інфрачервоний, а також їх поєднання. Більшість технологій отримання чипсів передбачають застосування різних смакових добавок, стабілізаторів, прянощів, як на стадії підготовки сировини, так і на заключній стадії [1 – 4]. Для цього необхідні додаткові компоненти, обладнання, що в свою чергу, збільшує собівартість кінцевого продукту. Крім цього, фруктово-овочеві чипси втрачають свою натуральність, стають більш калорійними і менш дієтичними.

Тому розробка енергоефективної теплотехнології виробництва фруктово-овочевих чипсів є актуальним завданням через відсутність в Україні масового промислового виробництва чипсів. Крім того, вирішення питань зниження енергоспоживання й інтенсифікації вологовидалення в процесі сушіння є актуальним науково-технічним завданням.

Мета. Аналіз режимів і способів попередньої обробки рослинної сировини на кінетику процесу зневоднення. Розробка енергоефективної теплотехнології виробництва фруктово-овочевих чипсів з використанням конвективно-конденсаційного методу сушіння, яка забезпечує отримання натурального продукту без смакових добавок, ароматизаторів і стабілізаторів.

Результати та їх обговорення.

Об'єктами досліджень були: яблука, груші, айва, хурма, банани і білі коренеплоди. Термолабільність сировини визначається вмістом в її складі органічних кислот, цукрів, пектинів, вітамінів, каротиноїдів, ефірних і ароматичних речовин. Тому, при розробці теплотехнології і проведенні експериментальних досліджень, враховувалися властивості і склад кожного виду сировини, підбиралися відповідні способи підготовки і режими сушіння таким чином, щоб максимально зберегти її натуральність і мінімізувати енерговитрати на сушіння.

При виробництві чипсів з фруктів бажано використовувати плоди середнього ступеня зрілості з білим щільним плодовим тілом, пізніх осінніх і осінньо-зимових сортів. Також слід враховувати величину цукрово-кислотного індексу (ЦКІ) вихідної сировини – відношення цукру до кислоти. Експериментально встановлено, що оптимальна величина ЦКІ, наприклад для яблук – 16...20, а для груш – 50...70. Вибір сировини з вказаною величиною ЦКІ позитивно позначається на смакових якостях чипсів, виключає можливість протікання реакцій карамелізації та меланоїдиноутворення, забезпечує збільшення вологообміну в процесі сушіння.

Підготовлені фрукти нарізали товщиною 3...6 мм, піддавали різним видам попередньої теплової обробки (паротермічній, обробці у розчинах лимонної кислоти і цукровому сиропі). Режими попередньої теплової обробки визначаються реакцією на пероксидазу – найбільш термостійкий фермент. Для його повної інактивації температура у центрі матеріалу повинна бути близько 85...90 °С. При попередній тепловій обробці відбуваються складні фізико-хімічні, фізичні, біохімічні та структурні перетворення, гідроліз протопектину, коагуляція білків протоплазми клітин, припиняються окисні процеси.

Аналіз режимів і способів попередньої обробки сировини на кінетику сушіння і на

органолептику готового продукту показав, що розглянуті види обробки забезпечують високу ступінь збереження кольору вихідної сировини (табл. 1) і прискорюють кінетику в порівнянні з необробленими зразками.

При паротермічній обробці тривалість процесу сушіння на 20...30 % менша, ніж при зневодненні необроблених фруктів [5]. Паротермічна обробка стабілізує кольорову та смакову гаму вихідного матеріалу, сприяє збереженню вітамінів, руйнуванню окисних ферментів.

Зразки оброблені в розчині лимонної кислоти мають найвищу швидкість кінетики сушіння, тривалість процесу на 14 % менша, ніж паротермічно оброблених, із чого витікає, що зниження рН середовища сприятливо впливає на клітинні мембрани, підвищуючи їхню проникність та інтенсивність процесу видалення вологи.

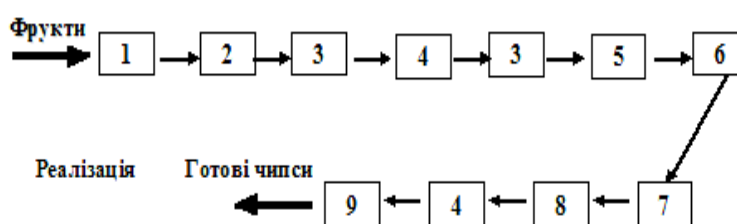
Процес сушіння зразків оброблених у розчині цукрового сиропу найтриваліший через закупорку капілярів сиропом, що особливо помітно на заключній стадії зневоднення. Але, бланшування у розчинах лимонної кислоти, як і у цукровому сиропі, негативно позначається на смакових показниках готового продукту. До того ж, такі види теплової обробки приводять до здорожчання продукту за рахунок придбання додаткових смакових компонентів, втрати натуральності, при цьому, порівняно з бланшуванням парою, відбуваються більші втрати поживних водорозчинних речовин.

Таблиця 1. Вплив попередньої теплової обробки рослинної сировини на колір зразка і готового продукту (на прикладі яблук)

Вид обробки	Зміна кольору свіжого зразка	Колір готових чипсів
необроблені	потемніння від 3 до 35 хв в залежності від сорту	світло-коричневий колір
паротермічна обробка	колір стійкий насичений	світло-кремовий колір
обробка у 0,1 % та 1 % розчинах лимонної кислоти	колір насичений	світло-жовтий колір
обробка у 10 % розчині цукрового сиропу	колір насичений	кремовий колір

Зневоднення здійснювалось методом конвективно-конденсаційного сушіння до залишкової вологості не більше 8 %. Проводився контроль тривалості перебування сировини в середовищі певної температури і вологовмісту, температура матеріалу під час зневоднення не перевищувала гранично-допустиму для термолабільних матеріалів.

На підставі отриманих результатів авторами розроблена схема технологічного процесу виробництва фруктових чипсів (рис. 1).

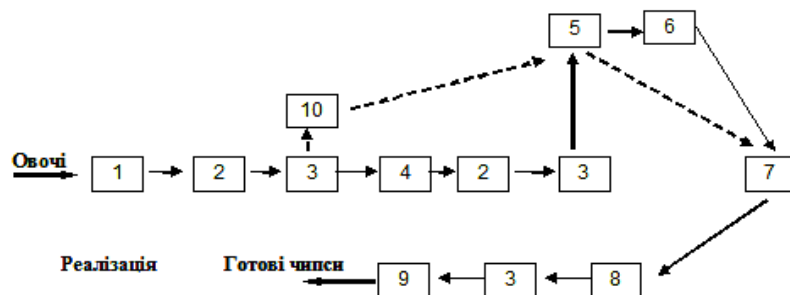


- 1 – бункер; 2 – ванна для замочування; 3 – мийна машина; 4 – інспекційний транспортер;
5 – машина для різки; 6 – апарат для паротермічної обробки; 7 – сушильна установка;
8 – апарат для охолодження; 9 – пакувальне обладнання

Рис. 1. Схема технологічного процесу виробництва фруктових чипсів

Для білих коренеплодів, що містять ароматичні речовини та ефірні масла, паротермічна обробка не проводилася. Сушіння здійснювали в режимі низькотемпературного зневоднення [6].

Схема технологічного процесу виробництва овочевих чипсів та чипсів з білих коренеплодів представлена на рисунку 2.



1 – бункер; 2 – мийна машина; 3 – інспекційний транспортер; 4 – термоочисна машина; 5 – машина для різання; 6 – апарат для паротермічної обробки; 7 – сушильна установка; 8 – апарат для охолодження;
9 – пакувальне обладнання; 10 – агрегат для механічного очищення

Рис. 2. Схема технологічного процесу виробництва овочевих чипсів та чипсів з білих коренеплодів

Висновки.

Аналіз і узагальнення результатів експериментальних досліджень дозволив розробити конвективно-конденсаційні режими процесу сушіння, відповідно до яких, здійснюється зниження температури і вологовміст сушильного агента постадійно, в залежності від виду сировини. Для уникнення перевищення температури матеріалу вище гранично допустимої, проводиться контроль тривалості перебування сировини в середовищі певної температури і вологовмісту, завдяки чому виключається перегрів матеріалу і руйнування термолабільних речовин фруктово-овочевої сировини.

Розроблена теплотехнологія виробництва фруктово-овочевих чипсів з використанням конвективно-конденсаційного методу сушіння інтенсифікує вологовидалення й підвищує енергоефективність процесу зневоднення на 10...15 %. Теплотехнологія захищена 9 патентами України, розроблені і затверджені технічні умови "Чипси фруктові, овочеві".

Література:

1. Method for making dehydrated apple chips: pat. CN104305041A China: A23L 1/212. № 201410529339; appl. 10.10.2014; pub. 28.01.2015.
2. Method of manufacturing diet chips of vegetables and fruits: pat. WO 2002074102 Poland: A23B 7/022, A23B 7/06, A23B 7/08, A23B 7/10, A23B 7/155, A23L 1/212. № PCT/PL2002/000013; appl. 15.03.2001; pub. 26.09.2002.
3. Способ производства пищевого продукта из яблок: пат. 10964 Беларусь: МПК⁸ A23L 1/212, A23B 7/005. № a20060519; заявл. 26.05.2006; опубл. 30.08.2008.
4. Способ производства плодовоовощных чипсов: пат. 2520142 Российская Федерация: МПК⁹ A23L 1/212. № 2012127498/13; заявл. 03.07.2012; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17.
5. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Сорокова Н.М., Гусарова О.В. Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37. № 6. С. 29–37.
6. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.А. Энергоэффективность теплотехнологий переработки растительных материалов. *Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии*: материалы конф., 3-я международная научно-техн. конф. (г. Москва, 2013 г.). Москва: МГОУ, 2013. С. 211–215.

УДК 664.8.047

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ФИТОЭСТРОГЕННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОРОШКОВ

Петрова Ж. А., д.т.н, Слободянюк Е. С., аспирант
Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

ENERGY-EFFICIENT PRODUCTION OF PHYTO- ESETROGENIC VEGETABLE POWDERS

Petrova Zh. A., Doctor of Technical Sciences, Slobodyanyuk E. S., Post-
Graduate Student
Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev

Аннотация: Соевый белок характеризуется достаточно хорошо сбалансированным аминокислотным составом, который почти соответствует балансу идеального белка. Как важнейший белоксодержащий продукт - соя, потребление которой способствует преодолению белкового голода, рекомендована Всемирной организацией здравоохранения.

Семена сои являются важнейшим источником растительных белков в диете людей и животных во многих странах мира. Подобно другим белкам, соевые протеины обеспечивают организм калориями, незаменимыми аминокислотами и азотом. Пищевая ценность белков является функцией многих факторов, включая аминокислотный состав, переваримость и потребность организма в белковых веществах. Белки высокой пищевой ценности полностью перевариваются, и они практически идентичны идеальному белку.

Обезвоживание растительных материалов - один из важных технологических этапов, который значительно обеспечивает качество готовой продукции. Соево - овощные смеси, как объекты сушки, являются сложными за своей структурой, физико - химическим и биохимическим составом. Они объединяют в себе как свойства сои, так и овощей с многим минеральным и витаминным составом и высокими питательными свойствами растительного белка. Содержание растительного белка наделяет их особыми свойствами, что требует тщательного исследования процессов обезвоживания.

Подобно другим белкам бобовых культур белки семян сои бедны на серосодержащие аминокислоты. Однако, соевые белки содержат достаточное количество лизина, которым бедны большинство белков зерновых культур. Это делает ценным комбинирование белков семян сои с белками зерновых культур, в которых недостаточно лизина и метионина.

В результате несколько меньшей биологической ценности и переваримости белков соевых продуктов по сравнению с белками мяса первые характеризуются и сниженной использованием в организме (нетто-протеиновая утилизация - NPU). Так, NPU соевых белков около 62, а мяса около 80, но зато NPU белков пшеничной муки всего около 46. Переваримость белков семян сои зависит от методов их технической обработки.

Abstract: Soy protein is characterized quite well balanced amino acid composition, which almost corresponds to the balance of the ideal protein. As the most important protein-containing product - soy, the using of which contributes to overcoming famine of the protein, is approved by the health organization.

Soybean seeds are the most important source of vegetable proteins in the diet of humans and animals in many countries around the world. Like other proteins, soy proteins provide the body with calories, essential amino acids and nitrogen. Nutritional value of proteins is a function of many factors, including amino acid composition, digestibility and the body's need for protein substances. Proteins of high nutritional value are completely digested, and their amino acid composition is almost identical to the ideal protein.

Dehydration of plant materials is one of the important technological stages, which significantly ensures the quality of the finished products. Soy - vegetable mixtures, as drying objects, are complex for their structure, physicochemical and biochemical composition. They combine in themselves both the properties of

soy and vegetables with many mineral and vitamin compositions and high nutritional properties of vegetable protein. The content of vegetable protein gives them special properties, which requires a careful study of the processes of dehydration.

Like other legume proteins, soybean protein proteins are poor in sulfur-containing amino acids. However, soy proteins contain a sufficient amount of lysine, which is poor in most of the proteins of cereal crops. This makes it valuable to combine the proteins of soybean seeds with protein from grain crops, in which there is not enough lysine and methionine.

As a result, the lower biological value and digestibility of proteins of soy products, compared with meat proteins, are also characterized by lower utilization in the body (net-protein utilization - NPU). So, the NPU of soy proteins is about 62, and the meat is about 80, but NPU proteins of wheat flour are only about 46. The digestibility of proteins of soybean seeds depends on the methods of their technical processing.

Ключевые слова: обезвоживание, белок, соя, сушение, число Ребиндера.

Key words: dehydration, protein, soy, drying, Rehbindner number.

Основная часть. На сегодняшний день соя - главный продукт американской сельскохозяйственной системы, особенно в штате Иллинойс, который уступает только Айове в годовым производстве. Соя - это не только здоровая еда, но и важный элемент здорового способа жизни [1].

За последние 10 лет Украина увеличила выращивание сои в 10 раз. Соя – основной источник фитоэстрогенов, поэтому очень важной является переработка цельного боба сои. Один из видов такой переработки – сушка сои и получение фитоэстрогенного порошка.

История сои прослеживается с Китая, где она считалась священным видом зерна, важное значение которого в качестве пищевого продукта и медицины. Другая часть мира вскоре обнаружила достоинства этого универсального растения, в том числе его ценных белков и растительных жиров. Соевые бобы также имеют антиоксиданты и фитоэстрогены[1].

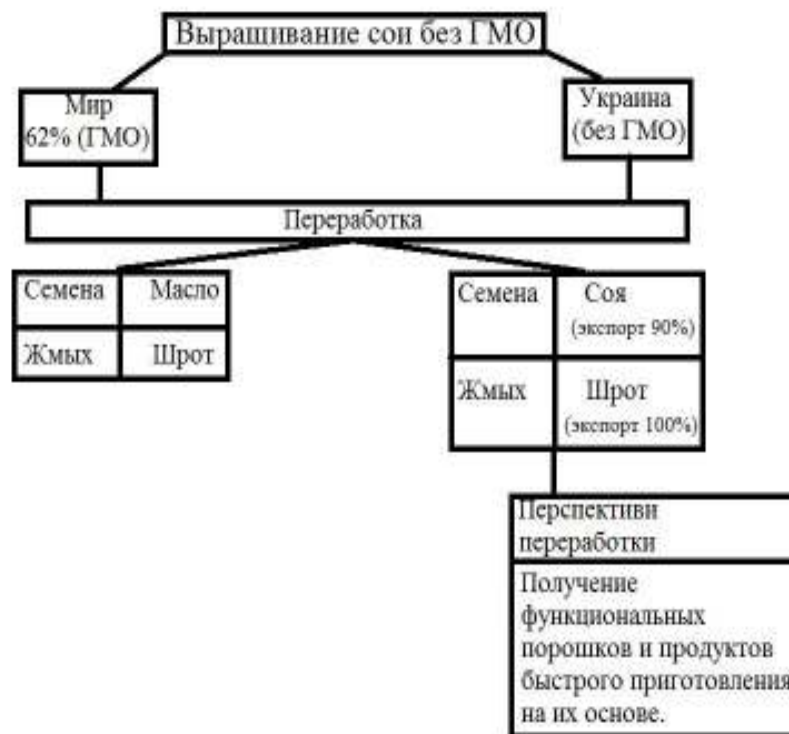


Рис.1. Перспективы выращивания и переработки сои

Изофлавоны также стимулируют выработку коллагена, типа белка, который обеспечивает прочность, гибкость и упругость кожи. Токоферол (витамин Е) - еще один антиоксидант в соевых бобах. Мы все знаем, как полезен витамин Е для здоровой кожи. Витамин Е защищает клетки кожи

от воздействия окружающей среды, которые повреждают кожу. Токоферол также имеет свойства антистарения. Есть несколько продуктов, в которых соя - основной компонент, а уровень и наличие этих природных антиоксидантов зависит от того, как обрабатывается соя[2].

Существует четкая корреляция между переваримостью соевых белков и активностью ингибиторов трипсина и альфа-химотрипсина в соепродуктах. Ингибиторы протеиназ значительно снижают переваримость белка путем снижения активности панкреатических ферментов [2].

Таблица 1.

Соевый продукт	Переваримость белков(%)
Поджаренная соя	78
Ферментированная соя (натто)	90
Тофу	91
Вареные соевые бобы	92
Замороженное соевое тофу	93
Соевый белок (юба)	100

В ряде работ отмечается, что у некоторых людей и животных отмечается аллергическая реакция на соевые белки. Показано, что аллергенными свойствами обладают ингибитор Кунитца; фракции глобулинов 2S, 7S и 11S определены как Glum Bd 30 K аллергены семян сои с молекулярной массой 34 кДа [2].

Однако, отмечается, что термическая обработка соевых продуктов разрушает белковые компоненты, обладающие аллергенными свойствами. Применяют также ферментативную, химическую обработку (1M H₂SO₄) для разрушения белков с молекулярной массой 34 кДа [3].

Было проведено экспериментальные исследования по сушке соево - морковной смеси в диапазоне температур теплоносителя от 80 до 120 °C, результаты которых показаны на рис. 2 кривыми кинетики обезвоживания. Совместный анализ полученных данных показал, что процесс сушения бинарной смеси проходит во втором периоде. В меру углубления зоны испарения в середину материала температура его поверхности повышается, а скорость влагоотдачи уменьшается. Продолжительность сушения материала в режиме теплоносителя 120 °C наблюдается резкое повышение температуры материала, и после того как материал достигает температуры 70 - 80 °C, он резко темнеет и портится его внешний вид [4].

На начале процесса (рис. 2) температура теплоносителя равняется 120 °C. Через 15-20 мин сушки температуру теплоносителя понижают до 100 °C (кривая 2 на рис. 2), а ещё через 20 мин температуру теплоносителя понижают до 80 °C (кривая 3 на рис. 2). Для сравнения на рис. 5 показаны кривые сушки соево - морковной смеси при 120 °C (кривая 1) и 80 °C (кривая 4). Сушеная смесь, полученная за режимами (кривые 2,3,4) имела светло - жёлтый цвет, со вкусом свойственным исходным ингредиентам.

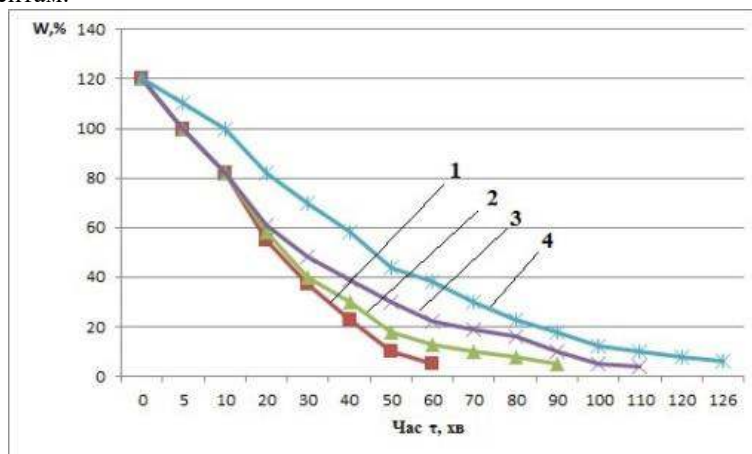


Рис. 2. Кривые сушки соево-морковной смеси за ступенчатыми режимами.

Итак, использование высокотемпературного носителя с целью интенсификации процесса ограничивается спецификой исследуемого материала. Обобщение кривых кинетики сушки в

полулогарифмической системе координат за методикой В.В. Красникова позволило определить критические влагосодержания бинарных смесей. Первое критическое влагосодержание 45 - 60, а второе 18 - 25% влажности материала и зависит от условий проведения эксперимента.

Исходя из результатов кинетики влагосодержание легко перейти к расчёту кинетики теплообмена бинарных смесей с целью определения оптимальных режимов сушки. Способом графического дифференцирования - кривых t - W рассчитано значение температурного коэффициента

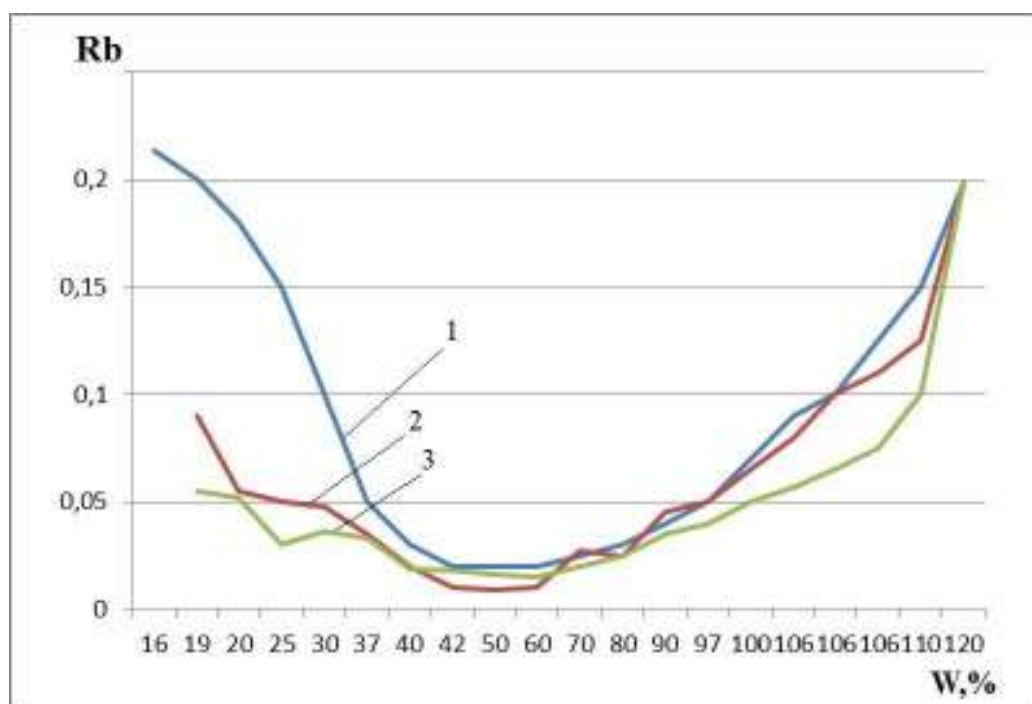
сушки $b = 100 dt / dW$, и числа Ребиндера $Rb = \frac{C}{r} \frac{dt}{dW} \cdot 100$, где C - теплоёмкость материала; r -

удельная теплота испарения.

Кроме этого, построено зависимости $Rb = f(W)$. Характер их изменения по разным режимам сушки оказался аналогичным (рис.3).

При достижении критического влагосодержания $W = 45 - 55\%$ число Rb начинает увеличиваться, что свидетельствует о том, что большая часть тепла теряется на нагрев материала, а не на выпаривание из него влаги. Это обстоятельство доказывает необходимость понижения температуры теплоносителя при достижении материалом критического влагосодержания $W = 45 - 60\%$. Итак, нет смысла поддерживать высокую температуру теплоносителя на последней стадии процесса обезвоживания. Обработка экспериментальных данных доказала, что число Ребиндера не зависит от скорости и влагосодержания теплоносителя, а определяется только тепловым режимом сушки.

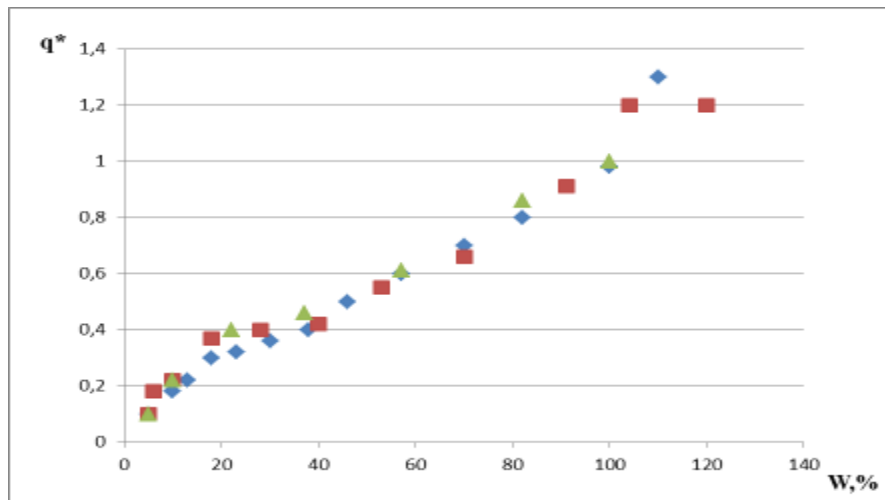
При помощи числа Ребиндера установлена связь между теплообменом и влагосодержание во время сушки $q^* = N^*(1 + Rb)$, где q^* - обобщенная плотность теплового потока; N^* - максимальная обобщенная скорость процесса сушки.



Температура теплоносителя t , °C: 1 - 120, 2 - 100, 3 - 80.

Рис. 3 - Изменение числа Ребиндера в процессе обезвоживания соево-морковной смеси: $V = 2$ м/с; $d = 10$ г/кг с.п.; гранулы размером $10 \times 10 \times 65$ мм; соотношение сои и моркови 1:1.

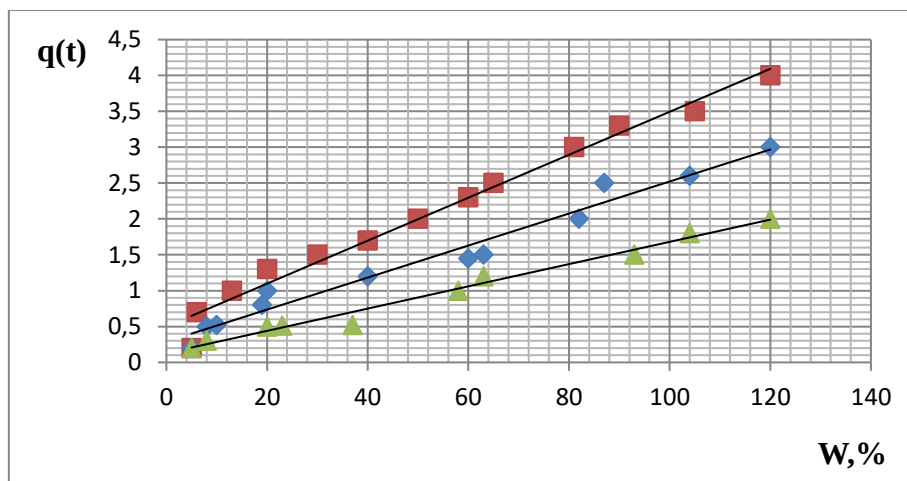
Относительная величина q^* графически показана на рис. 3. Используя зависимость $q^* = q / q_0$, где q_0 - плотность теплового потока на начале процесса сушки.



Температура теплоносителя t , °C: квадрат - 120, ромб - 100, треугольник - 80.

Рис. 4. Обобщенная плотность теплового потока при t , °C: ромб - 80; квадрат - 100; треугольник - 120.

Рассчитаны значения плотности теплового потока для разных температурных режимов (рис. 5).



Температура теплоносителя t , °C: квадрат - 120, ромб - 100, треугольник - 80.

Рис. 5. Изменение плотности теплового потока при сушке соево - морковной смеси : $V=2$ м/с; $d=10$ г/кг с. п.; гранулы размером 10 x 10 x 65 мм; соотношение сои и моркови 1:1;

Как видим, во время удаления влаги из материала плотность необходимого теплового потока уменьшается. При этом наибольшее значение отвечает самому интенсивному режиму сушки.

Выводы. Проведённые исследования дают возможность сделать вывод, что оптимальным режимом сушки должен быть режим, за которым температура материала не превышает 70 - 80 °C. С понижением влагосодержания уменьшается величина Ребиндера (R_b), то есть тепло во время сушки большей степенью тратится на испарение влаги из материала, чем на его нагрев.

Подтверждена необходимость понижения температуры теплоносителя на конечной стадии процесса сушки, это безусловно позитивно влияет и на качество сушёного материала.

За итогами проведённых исследований разработаны ступенчатые режимы сушки соево - морковной смеси, при которых температура теплоносителя изменяется во время сушки.

Предложенные ступенчатые режимы позволили уменьшить энергетические затраты на сушку, сократить время сушки и, как следствие, максимально сохранить качество состава смесей, получить продукт с высокими потребительскими свойствами долгого срока хранения.

Литература

1. Theodore Hymowitz. The History of the Soybean. - Department of Crop Sciences, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL 61801, September ,2015, pages 1–31.
2. Снежкин Ю.Ф., Петрова Ж.А. Теплообменные процессы во время получения каротиносодержащих порошков. - Киев: ВД «Академперіодика», 2007.-162 с.
3. Снежкин Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М. Энергоэффективные теплотехнологии производства функциональных пищевых порошков, Винница: ВНАУ, 2016. –458 с.
4. Петрова Ж.А., Слободянюк Е.С. Исследование кинетики сушки соево-морковной композиции. – Киев: НУХТ, материалы 83 международной научной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научные достижения молодежи – решение проблем питания человечества в XXI столетии», часть 2, 5-6 апреля 2017. – 159с.

УДК 664.8.047.014

СВЯЗЫВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПРЕБИОТИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ

Петрова Ж.О., доктор технических наук, главный научный сотрудник
Институт технической теплофизики
Национальной академии наук Украины, г. Киев

BINDING OF HEAVY METAL IONS BY MEANS OF FUNCTIONAL PREBIOTIC POWDERS

Petrova Zh. A., Doctor of Technical Sciences,
Institute of Engineering Thermophysics,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

***Аннотация.** В результате энергоэффективной предварительной обработки растительного сырья, оптимальных режимов сушки и дробление высушенного продукта, были получены пребиотические функциональные порошки.*

Нативный пектин порошков с ионами тяжелых металлов образует нерастворимый комплекс, который выводится из организма человека. Приведены результаты исследований связывания ионов тяжелых металлов функциональными пребиотическими порошками с целью определения их радиопротекторных свойств в сравнении с чистым пектином. В результате исследований впервые определены высокие комплексообразовательные свойства пребиотических растительных порошков. В процессе усвоения продуктов питания в организме человека происходит поддержка его жизненных функций, здоровья. При правильном и сбалансированном питании уменьшается риск различных заболеваний, происходит профилактика старения.

Функциональные продукты относятся к категории продуктов, которые обеспечивают организм человека не только энергией и пластическими веществами, а выполняют в первую очередь оздоровительную функцию.

Создание профилактических и лечебных продуктов данного направления основана на концепции введения в их рецептуру примесей удовлетворяющих следующим требованиям: безопасность для организма и эффективное связывание тяжелых металлов (образование с ними прочных нерастворимых комплексов, устойчивых к действию ферментов в широком диапазоне pH). В некоторой степени этим требованиям отвечают пищевые полисахариды которые находятся в пребиотических функциональных порошках.

Abstract. As a result of energy-efficient pre-treatment of plant raw materials, optimal drying regimes and drying of dried product, prebiotic functional powders were obtained.

Native pectin of powder interacting with heavy metals ions forms an insoluble complex and it is output from the human body. This article presents the results of studies of binding heavy metal ions functional prebiotic powder to determine their radioprotective properties compared with pure pectin. As a result of studies (for the first time) was identified high complexing properties of prebiotic vegetable powders. In the process of

assimilation of food in the human body, there is support for his vital functions, health. With the right and balanced nutrition reduces the risk of various diseases, there is prevention of aging.

Functional products belong to the category of products that provide the human body not only with energy and plastic substances, but in the first place perform a health function.

The creation of prophylactic and curative products of this direction is based on the concept of introducing impurities into their formulation that meet the following requirements: safety for the organism and effective binding of heavy metals (formation of strong insoluble complexes resistant to enzymes in a wide pH range). To some extent these requirements are met by food polysaccharides which are in prebiotic functional powders.

Ключевые слова: пребиотические порошки, пектины, связывание, функциональные продукты.

Key words: prebiotic powders, pectins, binding, functional products.

Взаимодействие элементов триады «человек - техника - природа» очень далеки от гармонии. Силовое воздействие первых двух составляющих третью ведет к необратимому противостоянию. Природа отвечает разрушительными стихийными катаклизмами, методической работой с коррозией металлических деталей технических изделий, введением в организм человека (через органы дыхания и приема пищи) вредных для него веществ [1-2].

К числу последних относятся тяжелые, в том числе радиоактивные металлы, контакт с которыми наиболее вероятный в зоне риска повышенного загрязнения окружающей среды (металлургические заводы, атомные электростанции и т. д.). Для группы населения, которые проживают в таких условиях, проблема профилактического питания предназначенного для вывода тяжелых металлов и радионуклидов является одной из главных. Для Украины это актуально после черновобильских событий.

Как пектин так и альгинаты являются естественными ионообменниками, способными замещать водород карбоксильных групп на катионы поливалентных металлов. Если в теоретическом плане альгинаты и пектины равноценны как агенты, связывающие тяжелые металлы, но в практическом плане, при использовании, предпочтение отдается пектину. Дело в том, что получение низкоэтерифицированных пектинов проще и дешевле, чем получение альгинатов с достаточно регулярными G - G - блоками. С другой стороны альгинаты не имеют пищевой ценности [3].

Пектины имеют те же функции, в то же время являются ценными пищевыми волокнами со свойством разнообразного положительного физиологического воздействия на организм.

Связывающую функцию пектинов характеризует комплексообразующая способностью (КО) - количество миллиграммов ионов металла, связывающей 1 г пектина. Комплексообразующая способность зависит от первичной структуры пектина, природы связанных металлов и pH среды. При этом [4]:

- по способности образовывать комплексы с пектином металлы разделяются на две группы - группа свинца и меди и группа стронция и цезия;
- комплексообразующая способность металлов первой группы слабо зависит от содержания полигалактуроновой кислоты в пектине и от степени этерификации образцов;
- для образцов второй группы зависимость от полигалактуроновой кислоты и степени этерификации более сильная. Так, образцы с <20% этерификацией связывают до 50% и более цезия и стронция, тогда как высокоэтерифицированный пектины малоэффективны для выведения радионуклидов из организма;
- комплексообразования данного иона металла зависит от происхождения пектинов. Так, комплексообразовательная способность калия в 3,8 раз выше в свекольном пектине, чем в цитрусов. Для свинца эта цифра соответствует 5,1;
- связывания свинца происходит более интенсивно в кислой среде, Sr - в щелочной (при pH 11 реакция соответственно [4] происходит интенсивнее в связи с реакцией деметилирования и освобождения реакционных карбоксильных групп).

На рынке Украины продукты оздоровительного питания представлены в основном в виде диетических пищевых добавок. Разница между диетическими пищевыми добавками и функциональными продуктами состоит в том, что в состав биологически активных добавок в максимальном количестве входят компоненты, которые не несут пищевой ценности.

Продукты функционального питания в отличие от них содержат пищевые нативные микронутриенты.

Пребиотические растительные порошки были разработаны на основе комплексного исследования тепломассообменных процессов переработки функционального растительного сырья. Технология получения этих порошков предусматривает предварительную подготовку сырья, сушку за разработанными энергоэффективными режимами ниже равновесной влажности (5-8 %). Это дало

возможность измельчить и сепарировать высушенные продукты с получением растительных пребиотических порошков дисперсностью от 0,16 мм до $\geq 0,5$ мм.

Функциональные порошки это сухие концентраты мякоти и сока свежих овощей, фруктов, бобовых и зерновых растений. Как видно из таблицы, при испарении влаги, все вещества концентрируются.

Химический состав полученных с функционального сырья пребиотических порошков представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав пребиотических порошков (% в перерасчете на 100 г сухого вещества)

№	Название порошка	Моно и дисахара	Клетчатка	Органические к-ты	Белок	Пектин	Зола
1.	Яблоко-груша	40,4	32,1	2,5	3,2	11,2	6,8
2.	Мандарин-яблоко	33,6	34,6	7,1	2,8	13,6	7,3
3.	Виноград-ст. свекла	31,5	32,5	8,3	3,5	17,6	10,1
4.	Свекла сахарная-яблоко	30,1	45,1	2,1	1,8	8,1	9,8
5.	Кабачок-яблоко	52,6	11,2	9,4	7,5	8,4	5,8

Наше время - это время высоких технологий и рафинированной пищи, поэтому употребление продуктов с большим содержанием клетчатки является очень актуальным. На долю клетчатки в функциональных порошках выпадает от 0,7 до 45% от общего содержания веществ, что является положительным фактором.

К неусваиваемых углеводов относятся пектины. Организмом они не усваиваются, но играют исключительно важную роль в процессе пищеварения.

Различают два вида пектиновых веществ - пектины и протопектины. Пектины являются метиловый эфир полигалактуроновых кислот. Протопектины являются нерастворенные в воде комплексами пектина с целлюлозой и гемицеллюлозой. Во время сушки, и в присутствии кислоты при температуре 80 - 85°C происходит частичное превращение протопектина в пектин.

Пектиновые вещества имеют выраженное биологическое действие. Под их влиянием снижается гнилостная микрофлора кишечника, происходит детоксикационное действие, во время которой адсорбируются экзо и эндогенные яды. Пектин ингибируя всасывание холестерина в кишечнике [5]. Содержание пектиновых веществ в функциональных порошках 2,1 - 17,6%.

Пребиотические функциональные порошки представляют собой комплекс пищевых волокон их содержание составляет от 50 до 87%. Одним из компонентов пищевых волокон является пектин. Термическая или тепловая обработка растительного сырья изменяет активность пектинов. При выделении влаги в мягких условиях происходит перегруппировка тех групп, которые обеспечивают желеобразование и комплексообразование. Были исследованы следующие функциональные порошки: яблочно-грушевый, мандариновый-яблочный, виноградно-свекольный, свекольный жом - яблоко, кабачково-яблочный.

В основу эксперимента положена комплексообразующая свойство пектина. Раствор соли металлов заданной концентрации контактировал с водной суспензией порошков по разнице введенного и оставленного металла находим процент связывания металла.

Как уже было отмечено другими авторами комплексообразующих свойство имеют преимущественно пектины. Исследование комплексообразующих свойств пребиотических порошков определили *in vitro* с разными металлами. Для сравнения использовали чистый яблочный пектин (табл. 2).

Количество связанного металла устанавливали спектрофотометрическим методом, учитывая условия образования цветных комплексов с соответствующим реактивом в соответствии с методами комплексометрии. Раствор соли металла известной концентрации некоторое время контактировал с водяным суспензией порошка. По разнице введенного и остаточного металла рассчитали процент

связывания металла. Также определяли pH конечных растворов, поскольку растворимые вещества отдельных порошков меняли этот показатель.

Таблица 2. Звязывание ионов тяжелых металлов пребиотическими порошками in vitro (% связаного металла)

Металл	рН- звязывания	Пектин яблочный	Функциональные порошки				
			Яблочно грушевый	Яблочный	Виноградно - свекольный	Свекольный жом - яблоко	Кабачково - яблочный
Свинец	3,5-5,6	60	75	68	76	80	71
Медь	4,0-6,0	55	58	59	60	57	56
Цинк	3,5-6,0	67	72	73	71	69	68
Цирконий	2,0-3,5	53	68	67	69	61	62
Цезий	1,5-3,0	47	52	48	51	49	50

В фильтрате контролировали оптимальную величину pH для каждого металла. Для установления количества свинца использовали пиридил-азорезорцин (ПАВ). Нами было установлено in vitro, что 1% раствора порошка связывает ионы свинца, цезия, циркония.

В таблице 2 приведены данные по комплексообразующим свойствам функциональных порошков свинца, меди, цинка, циркония, цезия. Самые высокие показатели получены по связыванию ионов свинца, этот показатель больше на 20% в порошке с свекольного жома и яблоки по сравнению с пектином яблочным. Эта зависимость наблюдается во всех функциональных порошках.

Как видно из табл. 2, комплексообразующая свойство пребиотических порошков на 9 - 20% превышает чистую пектин. Это можно объяснить тем, что пребиотические порошки содержат нативный пектин. Это обусловлено также и высоким содержанием клетчатки в этих порошках.

Пребиотические порошки которые имеют высокое содержание пектинов обладают комплексообразующих способность до 80%, а чистый пектин 60%, яблочный порошок 68%. Учитывая, что связывание ионов тяжелых металлов пребиотическими порошками достигает 50 - 80%, целесообразно признать их высокие радиопротекторные свойства. Самые высокие показатели получения по связыванию ионов свинца, этот показатель больше на 20% в порошке с свекольного жома и яблока по сравнению с пектином яблочным. Эта зависимость наблюдается во всех функциональных порошках.

Выводы. Исследования показали, что процент связывания ионов тяжелых металлов функциональными порошками разнообразен и зависит от pH среды, вида сырья, его технологической обработки и режимов сушки.

Впервые были разработаны пребиотические порошки, имеющие комплексообразующее свойство выше, чем у препаратов выделенного чистого пектина. На эти порошки полученные выводы Минздрава и разработаны нормативно-техническую документацию.

Литература:

1. Зайцев, А. Н. Медико-биологические требования к качеству сырья и продуктов / А. Н. Зайцев, // Пищевая пром.-ть, 1990. – № 6. – С. 4 – 5.
2. Зайко, Г. М. Получение очищенного пектина для использования в лечебных и профилактических целях / Г. М. Зайко, Тамова М. Ю. // Известия вузов. Пищевая технология, 1998. - №1. – С. 13 – 19.
3. Бухтоярова, З. Т. Разработка рецептур пастилы с пектином и β-каротином / З. Т. Бухтоярова, Г. М. Зайко, М. Ю. Тамова // Известие вузов. Пищевая технология, 1993. - № 3-4. – С. 58 – 60.
4. Птичкин, И. И. Пищевые полисахариды: структурные уровни и функциональность / Птичкин И. И., Птичкина Н. М. // ГУП «Типография №6» - Саратов, 2012.- 96с.
5. Krusen B. Recovery of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) in the small intestine of man / Bach Krusen KE, Hesso I.// Br J Nutr 1995; 74: 101 – 113.

УДК 532.528:66.061

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТІВ

Гоженко Л. П. канд. техн. наук, Коник А. В. канд. техн. наук, ст. наук.
співр.,

Радченко Н. Л. канд. техн. наук, ст. наук. співр., Целень Б. Я. канд. техн. наук,
ст. наук. співр., Недбайло А. Є. канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

ENERGY EFFICIENT EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF PLANT EXTRACTS

L. Hozhenko Ph.D., A. Konyk Ph.D., senior researcher, N. Radchenko Ph.D.,
senior researcher, B. Tselen Ph.D., senior researcher, A. Nedbailo Ph.D.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Kyiv

Анотація: Статтю присвячено застосуванню потужних кавітаційних механізмів, які на сьогодні є одним з найбільш діючих способів досягнення високих енергетичних показників у технологіях обробки рідинних дисперсних середовищ. На базі літературного огляду встановлено, що застосування кавітаційних пристроїв дозволяє радикально впливати на характер протікання тепломасообмінних, гідродинамічних, хімічних та біофізичних процесів на мікро- та нанорівнях. Описано принцип роботи розробленого в Інституті технічної теплофізики НАН України кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстракції рослинної сировини. Проаналізовано основні динамічні ефекти, які інтенсифікують процеси гідродинаміки і тепломасообміну в пульсаційному апараті. Представлено результати експериментальних досліджень водної екстракції чистотілу при застосуванні кавітаційного механізму. Обґрунтовано та встановлено раціональний ступінь подрібнення трави чистотілу для подальшої обробки в апараті пульсаційного типу. Наведено фізико-хімічні параметри водного екстракту чистотілу залежно від температурних режимів обробки. Визначено залежності солемісту, електропровідності, окисно-відновного потенціалу, водневого показника водної системи (рН), кількості сухих речовин в отриманому екстракті від тривалості кавітаційної обробки. Встановлено, що кавітаційний вплив на середовище приводить до зниження окисно-відновного потенціалу водної системи пропорційно зниженню імпульсів тиску. На основі отриманих результатів досліджень процесу кавітаційної екстракції чистотілу показано, що застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу забезпечує максимальний вихід цільових компонентів за короткий час при порівняно низьких температурах. Надано рекомендації щодо температурних режимів процесу екстракції трави чистотілу за умови ініціювання кавітаційних механізмів при оптимальних технологічних параметрах процесу і режимах роботи пульсаційного апарата. Проведено оцінювання ефективності процесу екстракції в кавітаційному реакторі пульсаційного типу та доведено його енергоефективне застосування в різних галузях промисловості. Встановлено, що найбільш економічно доцільною сферою застосування дослідженого екстракту чистотілу, отриманого в кавітаційному реакторі пульсаційного типу, є косметична промисловість.

Abstract: The article is devoted to the use of powerful cavitation mechanisms which today is one of the most effective ways to achieve high energy performance processing technologies in liquid dispersion media. Based on the literature review found that the application of cavitation devices can drastically affect the character of heat and mass transfer, hydrodynamic, chemical and biophysical processes at the micro- and nanoscale. Describes the work developed by the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine pulsating cavitation reactor type extraction plant materials. The basic dynamic effects that intensify the processes of hydrodynamics and heat transfer in the pulsating apparatus. The results of experimental studies Celandine water extraction in the application of cavitation mechanism. Grounded and set reasonable degree of grinding celandine herbs for further processing in the apparatus pulsating type. An

physico-chemical parameters of aqueous extract of celandine depending on the temperature conditions of processing. The dependence of salt content, conductivity, redox potential, pH of the water system, the amount of solids in the extract obtained from the duration of cavitation treatment. Established that the cavitation effect on the environment resulting in lower redox potential of the water system proportionally reduce pressure pulses. Based on the research results cavitation extraction process celandine shown that the application of cavitation reactor pulsating type for maximum yield components in a short time at relatively low temperatures. The recommendations on the extraction process temperature conditions subject celandine herbs initiate cavitation mechanisms for optimal technological parameters of the process and pulsating modes of the machine. An evaluation of the efficiency of the extraction process in a pulsating cavitation reactor type and its proven energy efficient use in various industries. It has been established that the most economically feasible field of application of the investigated extract of chi-stottil obtained in the cavitation reactor of the pulsating type is the cosmetic industry.

Ключові слова: кавітація, екстракція, пульсаційний апарат, рослинна сировина.

Keywords: cavitation, extraction, pulsation device, plant raw material.

Основним завданням при розробці енергоефективних технологій є підвищення техніко-економічних показників виробництва при переробці сировини. Зокрема, підвищення продуктивності обладнання і зниження енерговитрат на проведення технологічних операцій передбачає створення та впровадження ефективних апаратів з малою питомою енергоємністю і матеріалоємністю, високим ступенем впливу на оброблювані речовини. Аналіз зарубіжної літератури та патентний пошук показав, що переважна більшість наукових робіт спрямована на пошук нових методів впливу на середовище в процесах диспергування, гомогенізації, екстракції тощо. В більшості робіт основна увага акцентована на інтенсифікації процесів екстракції та диспергування з застосуванням апаратів, в яких реалізується механізм знакоперемінного тиску [1 – 7]. В публікаціях [3, 5, 8, 9] детально розглянуто пульсаційний вплив на середовище в процесі обробки і представлено широке впровадження результатів в різних ресурсо-енергоощадних технологіях.

Актуальною проблемою завжди залишається економічне, раціональне, ресурсозбережне та енергоефективне отримання біологічно активних компонентів природного походження для подальшого застосування у різних галузях промисловості. В провідних економічно розвинених країнах світу рослинні екстракти віднесені до групи косметично-активних речовин і широко використовуються при виробництві косметичних товарів та продаються як сировина для їх одержання. В статті наведено результати комплексного дослідження технологічних режимів отримання біологічно активних компонентів на прикладі чистотілу, оскільки його водний екстракт має одночасно протимікробну, фагоцитарну, мітотичну і антиоксидантну активність і може використовуватись в різних галузях.

Експериментальні дослідження процесу екстракції чистотілу проводились на розробленому в ІТТФ НАН України енергоефективному кавітаційному реакторі пульсаційного типу. Принципову схему представлено на рис. 1. Принцип роботи апарата полягає в наступному: суміш екстрагента з подрібненою рослинною сировиною знаходиться у завантажувальному резервуарі під атмосферним тиском p_a при температурі T_1 . В процесі роботи екстрактора рідинна суміш надходить в робочу камеру із резервуара або витікає з камери в резервуар через циліндричну трубу, яка герметично з'єднана з нижньою поверхнею камери. Верхня і нижня поверхні робочої камери мають форму кульового сегмента, між якими знаходиться еластична мембрана, що відокремлює рідинний та газовий тракти апарата. Через отвір на верхній поверхні робоча камера з'єднується із газовим трактом. Трьох ходовий електромагнітний клапан УЕ 24/1-2 періодично з заданими інтервалами часу підключає камеру до ресивера високого тиску (РВТ), з'єданого з компресором РМ-3102.00, або ж до ресивера низького тиску (РНТ), підключеного до вакуумного насоса рідинно кільцевого типу ВВН-1,5/0,4. Величини тиску в РВТ задаються в інтервалі $p_{comp} \cong 0,2 \div 0,5$ МПа, а в РНТ – в інтервалі $p_{vac} = 0,001 \div 0,003$ МПа. На стадії підключення камери до РВТ мембрана під дією високого тиску інтенсивно виштовхує рідину з камери через трубу в резервуар. При перекритті мембраною отвору на нижній поверхні камери вся рідина виходить з камери. В цей момент швидкість течії в трубі досягає максимального значення (близько 10 м/с) і рідина продовжує рухатися вниз по трубі за інерцією (без контакту з мембраною). Після відриву рідинної суміші від мембрани у верхній частині труби утворюється порожнина під вакуумом з безперервно зростаючим об'ємом, що поступово заповнюється паром. Встановлено, що внаслідок швидкого руху стовпа

рідини тиск пари в порожнині суттєво нижчий тиску насиченої пари $p_{\text{sat}}(T_1)$. Тиск в рідині на границі з порожниною миттєво понижується від величини $p_{\text{comp}} \cong 0,3 \text{ МПа}$ до $p_1 < p_{\text{sat}}(T_1) \cong 0,002 \text{ МПа}$, що приводить до закипання рідинної суміші поблизу вільної поверхні.

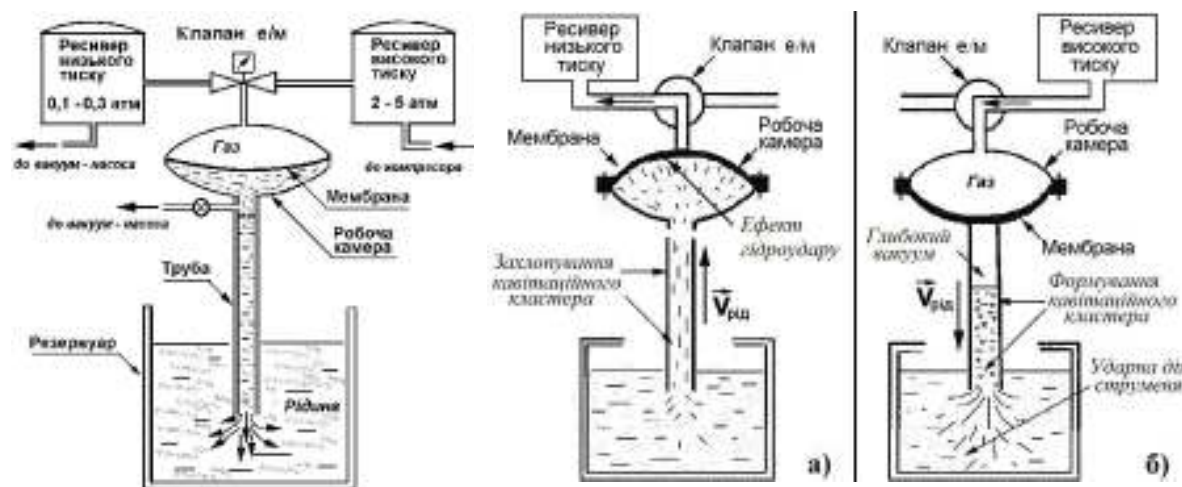


Рис. 1. Принципова схема кавітаційного реактора пульсаційного типу та основні динамічні ефекти: а) стадія впуску рідини в робочу камеру; б) стадія виштовхування рідини з камери

Встановлена різниця тисків $p_a - p_{\text{sat}}(T_1)$ та дія сили тертя об стінку спричиняють різке гальмування рідинної суміші в трубі, яка потім змінюючи напрям, рухається зі зростаючою швидкістю до камери доки не дійде вхідного отвору в камеру. Якщо до цього моменту камера все ще підключена до РВТ, то вхід в камеру перекритий, і рідинна суміш, що рухається відразу зупиняється. Якщо ж камера з'єднана з РНТ, то рідинна суміш із труби швидко заповнює камеру і зупиняється на мембрані, що прилягає до верхньої поверхні камери. В обох випадках миттєва зупинка потоку ініціює явище гідралічного удару. При наступному підключенні камери до РВТ цикл повторюється. Частота повторень циклів в залежності від режиму, знаходиться в діапазоні $0,5 \div 1,5 \text{ Гц}$.

На рис. 1 показані основні динамічні ефекти, що реалізуються в кавітаційному екстракторі. До них відносяться: динамічний вплив струменя, що витікає з труби в резервуар і сприяє інтенсивному турбулентному перемішуванню суміші; вплив гідралічного удару, що виникає внаслідок гальмування зворотного потоку на поверхні мембрани, який супроводжується високочастотним змінням стиснення та розрідження в камері й трубі та, як наслідок, виникненням вторинних кавітаційних ефектів. Найбільш потужні кавітаційні ефекти виникають після виходу рідини з камери в трубу внаслідок порушення суцільності потоку в момент перекриття отвору мембраною. При цьому тиск на верхній границі рідини $p_{10} = 0,3 \text{ МПа}$ миттєво спадає до від'ємного значення з амплітудою $-0,3 \text{ МПа}$. Падіння тиску обумовлено ефектом розтягу вільного стовпа рідини, яка до цього була стиснена. Явище, що виникає в момент миттєвого перекриття вхідного отвору, за своєю природою властиве другій і третій стадіям гідралічного удару. Імпульс від'ємного тиску від вільної поверхні рідини розповсюджується вздовж труби до вихідного перерізу каналу зі швидкістю звуку в рідині c_{ac} , а потім повертається у формі імпульсу стиснення. При довжині труби $L = 60 \text{ см}$ імпульс проходить цю відстань за $0,4 \text{ мс}$. Відповідно до теорії гідралічного удару час існування імпульсу від'ємного тиску всередині труби визначається співвідношенням $\Delta\tau_{\text{pmin}} = 2L/c_{\text{ac}}$ і складає приблизно $0,8 \text{ мс}$. За цей проміжок часу рідина в трубі встигає переміститися лише на 8 мм . З цього випливає, що фаза розтягу в зоні рідини поблизу її вільної поверхні продовжується близько $0,8 \text{ мс}$, а потім настає фаза стиснення, при якій $p_1 \gg p_a$.

Отже, в результаті розриву суцільності потоку і раптового розтягу рідини вниз по трубі проходить імпульс від'ємного тиску. При цьому виникають і формуються з інтенсивним зростанням парові бульбашки в екстрагенті протягом часу, за який фронт розрідження досягне вихідного

перерізу труби. Наступний фронт стиснення, що розповсюджується в напрямі камери приводить до миттєвого захоплення бульбашок з виникненням потужних мікро масштабних кавітаційних ефектів. Якщо декремент затухання коливань знакозмінного тиску невеликий, то процес зростання і захоплення парових бульбашок за час перекриття отвору камери мембраною буде спостерігатися багаторазово.

У вище описаному фізичному змісті полягає ініціювання основного та найпотужнішого кавітаційного механізму в пульсаційному апараті при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). На представленій фізичній моделі базується проектування енергоефективного кавітаційного обладнання пульсаційного типу для екстракції рослинної сировини різними екстрагентами.

Проведення процесу екстракції із застосуванням тільки інтенсивного перемішування середовища забезпечує умову зростання коефіцієнта конвективної дифузії до нескінченності, тобто конвективне масоперенесення здійснюється миттєво, і коефіцієнт масопередачі визначається тільки коефіцієнтом дифузії в порах рослинної сировини. Ініціювання кавітаційного механізму при обробці в реакторі призводить до значного прискорення процесу на найбільш його повільній стадії, тобто дозволяє впливати на коефіцієнт внутрішньої дифузії. За рахунок інтенсивного коливання частинок системи «тверде тіло – рідина» в місцях тертя відбувається локальне підвищення температури, зменшення в'язкості екстрагента, а отже, і підвищення коефіцієнта внутрішньої дифузії.

Оскільки дослідження проводили з використанням апарата, в якому реалізуються одночасно процеси диспергування і екстракції, то для отримання не забрудненого екстракту трави чистотілу сировину завантажували подрібненою до оптимальних розмірів $l=3\div5$ см. В ході проведення досліджень встановлено, що при менш тонкому подрібненні різко збільшується кількість розірваних клітин. Це стає причиною вимивання супутніх речовин, які забруднюють водну систему (білки, слизи, пектини та інші високомолекулярні сполуки), що візуально спостерігається при обробці. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано водні системи не каламутні, які легко фільтруються.

На основі аналізу економічних і технологічних аспектів відпрацювання процесу екстракції трави чистотілу проводились при температурах 6 і 27 °C та гідромодулі 1:8. Зразки водної системи відбирались в процесі обробки з п'яти хвилинним інтервалом для подальшого визначення фізико-хімічних властивостей за допомогою вимірювального комплексу EZODO PCT-407. У всіх відібраних пробах значення водневого показника знаходилося в межах $pH=6,5\div6,78$. Однак значення солевмісту (рис. 2 а) та електропровідності (рис. 2 б) при температурі екстракції 27 °C носять стабільніший характер ніж у зразках отриманих при 6 °C. Це можна пояснити не насиченістю розчину при температурі 6 °C, оскільки під час ведення процесу екстракції спостерігається значне локальне підвищення температури і, відповідно, зростання коефіцієнта внутрішньої дифузії. При температурі 27 °C середовища спостерігалось помірне локальне підвищення температури. Проте в обох випадках мало місце нагрівання середовища за рахунок використання методу ДІВЕ та реалізації його найпотужнішого кавітаційного механізму.

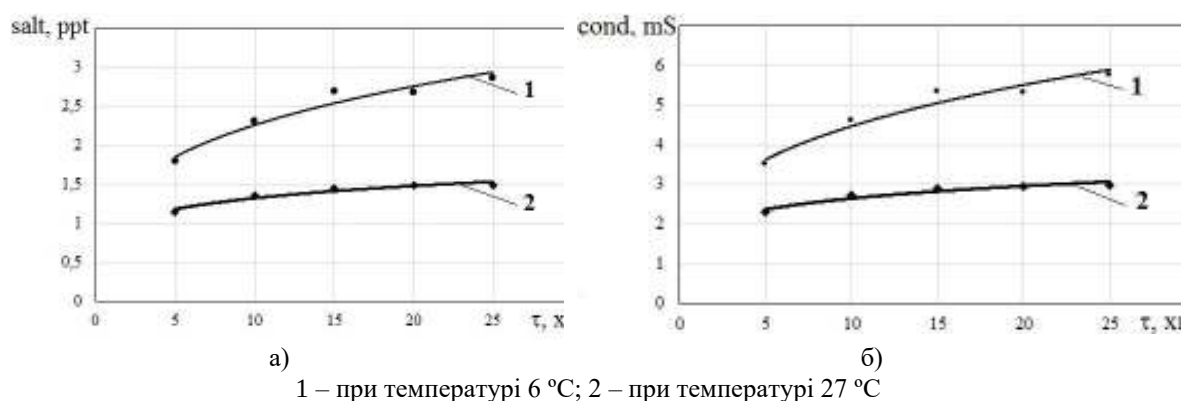


Рис. 2. Залежність солевмісту (а) та електропровідності (б) водного екстракту чистотілу від тривалості обробки

Визначення кількості сухих речовин в отриманих зразках проводили відповідно до методики за ГОСТ 28561-90. Отримані результати наведено на рис. 3. Представлені залежності свідчать, що

15 хв обробка в кавітаційному реакторі забезпечує рівноважність концентрацій цільових речовин в сировині та екстракті як при температурі 6 °С, так і 27 °С. Зазначимо, що в ході проведення досліджень температуру 27 °С підтримували протягом всього періоду обробки, а це, відповідно, додаткові енерговитрати. Натомість температуру 6 °С не доводилось підтримувати. Це була постійна температура водної системи при кімнатній температурі. Проте, порівняно максимальний вихід кількості сухих речовин (1,2 %) можна досягти при постійній температурі середовища 27 °С.

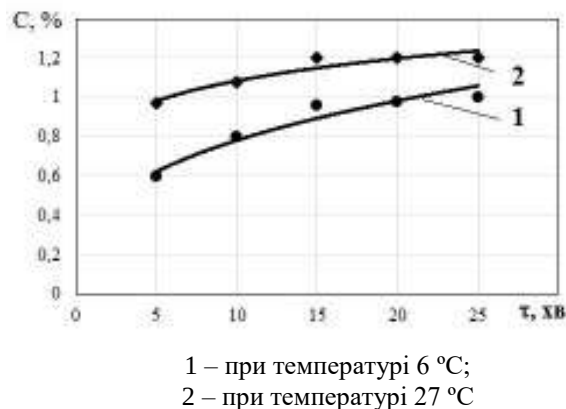


Рис.3. Залежність кількості сухих речовин в отриманому екстракті від тривалості обробки

порядок відрізняються. Втім, щоб описати якість отриманої водної системи, насиченої цільовими речовинами, потрібно мати дані біологічних та хімічних параметрів при окислювальних реакціях. Загальновідомо, що вміст кисню у воді має обернений характер відносно температури, тобто з її підвищенням завжди знижується. Локальне підвищення температури внаслідок реалізації кавітаційного механізму в системі приводить до вивільнення кисню. Зниження ОВП вказує на збільшення відновлюваних речовин у системі, а його зростання – окислювальних. Відповідно, можливо впливати на релаксацію ОВП через кавітаційну обробку. Внаслідок кавітаційного впливу на середовище зменшення значення ОВП пропорційне зниженню імпульсів тиску.

Висновки

Динамічні ефекти гідродинамічної кавітації, які властиві реактору пульсаційного типу, мають різний вплив на водні системи в процесі екстракції залежно від тривалості обробки і температурних режимів. Отримані значення фізико-хімічних параметрів: рН, солеміст, електропровідність, ОВП дозволяють оцінювати ефективність процесу екстракції із застосуванням кавітаційного механізму. Значення рН водного екстракту чистотілу протягом 25 хв обробки при температурах 6 °С і 27 °С знаходились в межах рН=6,5÷6,78, проте значення ОВП при цих температурах на порядок відрізнялись. Електропровідність та солеміст змінювались не суттєво при 27 °С. При температурі 6 °С відбулося зростання показників приблизно у 1,5 рази. Визначення кількості виходу сухих речовин від тривалості обробки показало, що 15 хв кавітаційний вплив на середовище при екстракції чистотілу забезпечує рівновагу масових концентрацій системи «тверде тіло – рідина», що приводить до скорочення тривалості процесу вилучення цільових речовин без додаткового підігріву до температури кипіння.

Процес екстракції водорозчинних речовин при кімнатній температурі має важливе значення для вилучення термолабільних речовин, що забезпечує оптимальне застосування кавітаційних механізмів в масообмінних апаратах.

Література

1. Іваницький Г. К., Гоженко Л. П. Аналітичне дослідження умов виникнення кавітації в трубі пульсаційного диспергатора ударного типу. – Пром. теплотехніка. – 2014. – Т. 36, № 6. – с. 5 – 12.
2. Іваницький Г. К., Чайка О. І., Гоженко Л. П. Застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстрагування з рослинної сировини. – Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: 2015. – Вип. 47. – Т. 2. – с. 138 – 42.

3. Иваницкий. Г. К., Корчинский А. А., Матюшкин М. В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. – Пром. теплотехника. – 2003.–Т. 25, № 1. – С. 29 – 34.
4. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. – Тернопіль: Видавн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 2009. – 220 с.
5. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. – К.: Наукова думка, 2008. – 381 с.
6. P. R. Gogate, S. Mededovic-Tagard, D. McGuire, G. Chapas, J. Blackmon, R. Cathey, Hybrid reactor based on combined cavitation and ozonation: from concept to practical reality, Ultrason. Sonochem. 21 (2014) 590–598.
7. Shahin Roohinejad, Mohamed Koubaa, Francisco J. Barba, Ralf Greiner, Vibeke Orlie, Nikolai I. Lebovka Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials Review Article Trends in Food Science & Technology, Volume 52, June 2016, Pages 98 – 108.
8. Накорчевский А. И., Басок Б. И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. – К.: Наук. думка, 2001. – 345 с.
9. Басок Б. И., Новицкая М. П., Чайка А. И. Гидродинамика и теплообмен при пневмопульсационном воздействии на жидкие системы. – К.: Калита, 2014. – 140 с.

УДК 663.918.23

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА МИКРОВОЛНОВОГО

ПРОТИВОТОЧНОГО ЭКСТРАКТОРА КОФЕ

Левтринська Ю.О., аспірант, Терзиев С.Г., д.т.н., доцент
Одеська національна академія пищевых технологий, г. Одесса

PRODUCTION TESTING OF MICROWAVE CURENT FLOW COFFEE EXTRACTOR MODEL

Levtrinska Yu.O., graduate student, Terziev S.G., doctor of technical sciences,
associate professor
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

Аннотация: Микроволновый противоточный экстрактор – аппарат в котором организуется режим противоточного движения твердой фазы и экстрагента, что способствует более полному извлечению экстрактивных веществ из сырья в экстракт. На основе анализа полученных данных выбран режим работы для запуска экстрактора для производственных испытаний. Проведена апробация микроволнового противоточного экстрактора при получении концентрированного кофейного экстракта. Исследована зависимость степени загрузки экстрактора продуктом и концентрации экстракта на выходе из аппарата. Изучена степень влияния слоя продукта в массообменных модулях и количества кассет. Верность гипотезы, согласно которой на выходе из экстрактора возможно получить кофейный концентрат с содержанием сухих веществ выше 50 %, подтверждается результатами экспериментальных исследований. Проведено прогнозирование, определяющее потенциал данного экстрактора. На основе результатов испытаний возможна дальнейшая оптимизация конструктивных параметров экстрактора для последующей разработки аппарата высокой производительности для нужд производства

Abstarct: The microwave counter-flow extractor is a device in which one the anti-precise motion of the solid phase (ground coffee grains) and the extractant (prepared water) is organized, which facilitates a more complete extraction of the extractable substances from the raw material into the extract. The basis for selecting the operating and technological parameters of the extractor operation, such as the extractor consumption, the power of the microwave generators, the degree of mass-exchange modules raw material loading, the equivalent diameter

200

of the raw material particles, the study of each of the parameters on one mass exchanger extractor unit with the fixed product layer and continuous movement of the extractant. Based on the analysis of the obtained data, the operating mode was selected for starting the extractor for production tests. The degree of influence of the product layer in mass-exchange modules (cassettes) and the number of cassettes was studied. The validity of the hypothesis, according to which at the output of the extractor, it is possible to obtain a coffee concentrate with a solids content of more than 50...60 %, is confirmed by the results of experimental studies. Provided a prediction that determines the potential of this extractor. Based on the test results, further optimization of the design parameters of the extractor is possible for the subsequent development of a high-performance apparatus for production needs. It is planned to provide extractors of similar design in production.

Ключевые слова: экстрагирование, волновые технологии, массообмен, микроволновый экстрактор, кофепродукты, пищекопцентраты.

Key words: extraction, wave technologies, mass transfer, microwave extractor, coffee products, food concentrates.

Введение. Растворимый кофе – простой в приготовлении напиток, который обладает тонизирующими свойствами и является природным, легальным стимулятором. Сырье для получения растворимого кофе – кофейные зерна, или бобы, плоды кофейного дерева, которое выращивается исключительно в каких экваториальных странах, к которым Украина не относится. Высокая стоимость сырья обуславливает потребность его максимально эффективного использования при переработке.

Для производства экстрактов кофе на отечественных предприятиях используются, в основном, устаревшие технологии. Возможны два пути развития оборудования для экстрагирования: эволюционный и инновационный. В первом случае повышение качества продукции и энергоэффективности достигается путем развития уже существующих аппаратов, оптимизации из работы, применения более совершенных систем регулирования. Однако, резерв повышения эффективности у таких методов невысок. При разработке инновационного оборудования идет поиск принципиально новых подходов к организации процесса, например, другие способы физического или химического воздействия на продукт: ультразвук, сверхнизкие температуры и принципиально новые экстрагенты, инфракрасное и микроволновое излучение.

В Одесской национальной академии пищевых технологий активно развивается направление волновых технологий, к которым относится микроволновое экстрагирование. Данные технологии заложены в основу настоящего исследования.

Формулировка задачи и анализ литературных источников. В производстве кофепродуктов на украинских предприятиях для экстрагирования в настоящее время преимущественно применяются баротермические технологии (традиционные), такие как метод батарейной экстракции. В таких агрегатах экстрагирование осуществляется при повышенном давлении и температурах близких к 180 °С. В таких условиях достигается гидролиз целлюлозы и из дробленого кофейного сырья извлекается максимальное количество экстрактивных компонентов.

Вышеперечисленные особенности ведения процесса сопряжены с рядом вытекающих недостатков традиционных экстракторов. Во-первых, баротермические экстракторы металлоемки и конструктивно сложны, вмешательство в процесс после загрузки, либо простые методы интенсификации с помощью перемешивания невозможны при данных условиях. Во-вторых, из-за воздействия высоких температур ухудшается вкус продукта, кроме того неразрешенной остается проблема доизвлечения экстрактивных веществ из шлама. Общая концентрация экстрактивных веществ в кофейном шламе нередко превышает 4...5 % [1]. В зависимости от сорта кофе максимальное содержание экстрактивных водорастворимых сухих веществ (с.в.), которые возможно извлечь, колеблется от 25 % (высший сорт арабики) до 35 % (сорта робуста и либерика). Также, в зависимости от сорта может немного варьироваться химический состав сырья, так например в высших сортах арабики больше кофейного масла и ароматических веществ, а в робусте – хлорогеновой кислоты и танинов, что обуславливает отличия во вкусе готового напитка [2].

В ряде исследований в области экстрагирования из растительного сырья подтверждается эффективность использования микроволнового подвода энергии. Положительный эффект достигается при использовании экстрагентов, состоящих из полярных молекул, например воды или спирта [3]. Исследователями получен максимальный выход экстрактивных веществ при низких температурах без ущерба для термолабильных и легколетучих веществ [4]. Технологии микроволнового экстрагирования используются при обработке лекарственных трав [5], виноградных косточек [6], эвкалипта [7], кофе [8] и корня цикория [9]. Разработанные экстракторы представляют собой исследовательские установки небольшой производительностью и предназначены для обработки образцов объемом в среднем до 100 мл.

Описания действующих образцов с высокой производительностью, предназначенных для условий производства, в открытых источниках информации не найдено. В основу данного исследования положены научные положения, согласно которым реализация последовательных стадий: промывка истощенных кофейных зерен исходным экстрагентом, истощение целевых компонентов из капиллярных структур зерен и укрепления экстракта позволит создать эффективный противоточный аппарат.

Второе научное положение утверждает, что использование в истощающей и укрепляющей зонах экстрактора подведения микроволновой энергии позволит инициировать мощный бародиффузионный поток целевых компонентов из объема сырья, что позволит при температурах процесса до 100 °С обеспечить практически полное извлечение целевых компонентов, снизить энергоемкость аппарата, повысить его производительность, обеспечить непрерывность технологии экстрагирования и повысить качество готового продукта. Для подтверждения этих гипотез необходимо проведение производственных испытаний экстрактора.

Материалы и методы исследования. Для эффективной эксплуатации и настройки режимов работы микроволнового противоточного экстрактора мало проведения эксперимента с одним массообменным модулем. При обратном движении экстрагента и экстрактанта имеет место сложная комбинация массообменных и гидродинамических процессов, образуются различные зоны влияния микроволнового поля, которые позволяют повысить эффективность работы аппарата.

Сырьем для экстрагирования был молотый кофе арабика первого сорта с дисперсным составом 3 ... 0,63 мм (> 3 мм – 5,4 %, 3,0 ... 2,5 – 13,8 %, 2 ... 2,5 – 21,8 %; 1 ... 2 – 52,2 %; 0,8 ... 1 – 6,38 %; 0,63 ... 0,8 – 0,24 %. Экстрагирование осуществлялось подготовленной водой. При получении экспериментальных данных использовались современные приборы, позволяющие получать результаты оперативно и точно. Для определения температур использовались пирометр излучения и тепловизор, для получения информации о концентрации экстракта применялся цифровой рефрактометр.

Экспериментальные исследования проводились на аппарате непрерывного действия, предназначенном для системы «твердое тело – жидкость», Состоит из вертикального корпуса с устройствами ввода и вывода фаз, сборника экстракта и генераторов импульсной микроволновой энергии. Аппарат отличается тем, что его корпус выполнен из каскада стальных резонаторных камер оснащенных магнетронами. Камеры соединены между собой шлюзовыми каналами, через которые с помощью домкрата перемещаются кассеты с сырьем. Конструкция кассет предназначена для осуществления противоточного движения через них экстрагента. В крышке каждой кассеты имеется отверстие, в которое вводится патрубок верхней кассеты.

Патрубок размещен на дне кассеты в противоположно отверстию. В каждой кассете исееется сетчатый фильтр перед входом патрубка. Вся конструкция выполнена из радиопрозрачного материала. Экстрагент подается через трубку в верхнюю кассету блока. Выходной патрубок последней кассеты блока соединяется с приемником экстракта, в котором накапливается готовый продукт. Камеры оснащены панелями управления, с помощью которых можно задавать мощность и время обработки, параметры отображаются на дисплее, встроенном в панель. В экстракторе предусмотрено регулирование расхода экстрагента и скорости движения кассет с продуктом.

Результаты исследований. При старте эксперимента в нижней камере был установлен блок из 4 кассет. Каждые две минуты добавлялась одна кассета с продуктом. Расход экстрагента составлял 7,2 кг / ч. В первом опыте серии исследований отработан первый цикл работы микроволнового противоточного экстрактора (МВПЭ). В кассеты было загружено 50 г молотого кофе и исследована кинетика экстрагирования, путем отбора проб экстракта на выходе из аппарата и определения его концентрации (рис.1).

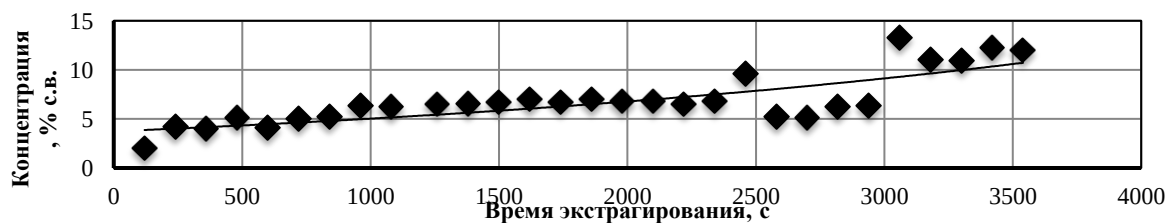


Рис. 1. Изменение концентрации экстракта на выходе из МВПЭ при загрузке кассет 50 г продукта.

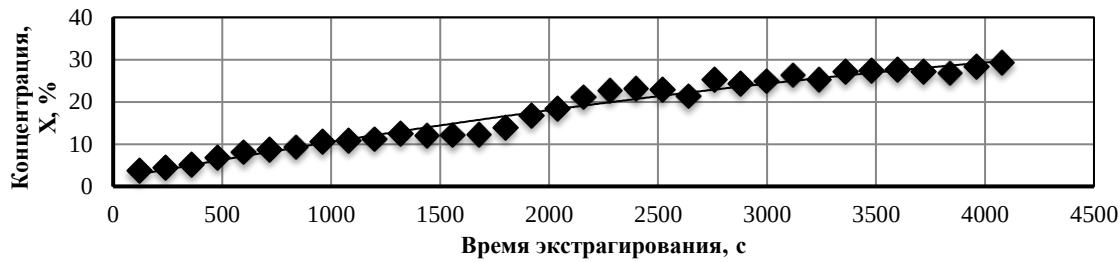


Рис. 2. Изменение концентрации экстракта на выходе из МВПЭ при загрузке кассет 100 г продукта.

На выходе из экстрактора после полной загрузки экстрактора по высоте был получен экстракт кофе и относительной концентрацией сухих веществ 15 %. Вторым этапом исследования было увеличение загрузки кассет до 100 г, остальные параметры были фиксированы. При планировании эксперимента предполагалось, что концентрация вырастет прямопропорционально загрузке кассет, то есть – в 2 раза. При проведении эксперимента был получен результат, показанный на рисунке 2.

Экспериментальные исследования подтвердили верность гипотезы, относительно влияния загрузки кассеты на концентрацию экстракта. На выходе был получен экстракт с концентрацией сухих веществ 29 %. Согласно результатам испытаний был разработан прогнозный график, представленный на рисунке 3. Согласно прогнозу, при увеличении загрузки до 300 г возможно получить жидкий концентрат кофе с содержание сухих водорастворимых веществ 50...60 %.

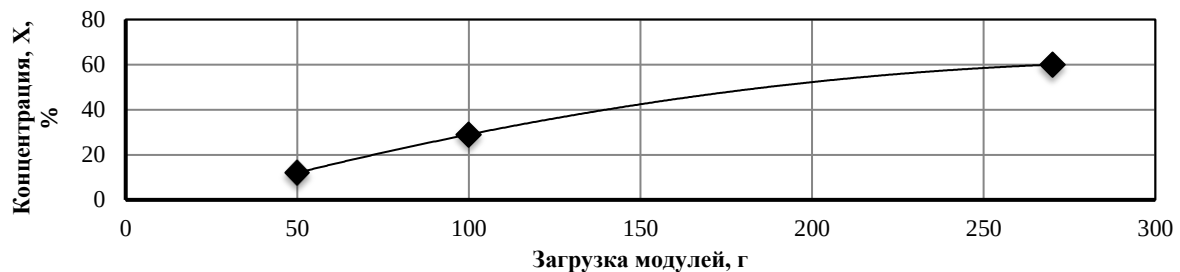


Рис. 3. График с прогнозированием результата для различной загрузки кассет

Прогнозируемая характеристика нелинейная, так как на более ранних этапах проводилась оценка влияния различных режимных параметров на процесс экстрагирования, в том числе – уровня продукта в кассетах (рис. 4). Полученные характеристики указывают на то, что с увеличением толщины слоя в кассетах эффективность извлечения из сырья несколько снижается.

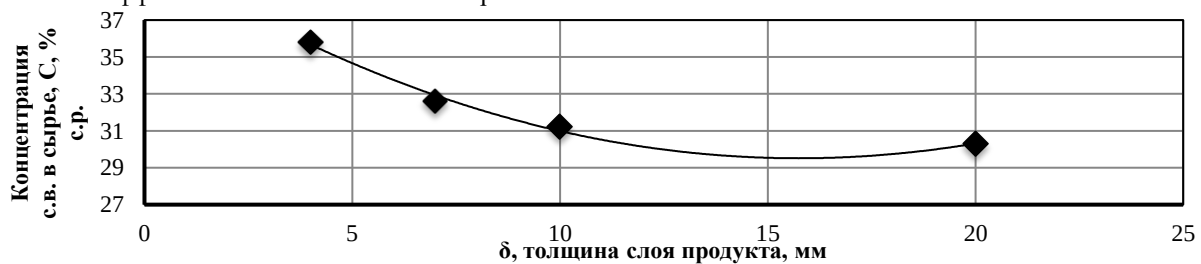


Рис.4. Влияние толщины слоя продукта на содержание экстрактивных веществ в зернах кофе.

По завершению прохождения кассеты по всей высоте микроволнового экстрактора была проведена оценка эффективности извлечения сухих веществ. Верхняя кассета блока, которая прошла по всей высоте экстрактора была удалена, а шлам проверен на содержание сухих веществ по стандартной методике.

Отобраные 100 грамм влажного шлама, влагосодержание которого составляло 84,6% были помещены в маботорный микровый экстрактор с обратным холодильником и в неподвижном слое из шлама доизвлекались компоненты. Эксперимент проводился до тех пор, пока экстракт приобретал окраску заметную невооруженным глазом. На рисунке 5 представлены результаты доизвлечения сухих веществ из шлама, полученного после прохождения кассеты по высоте микроволнового экстрактора.

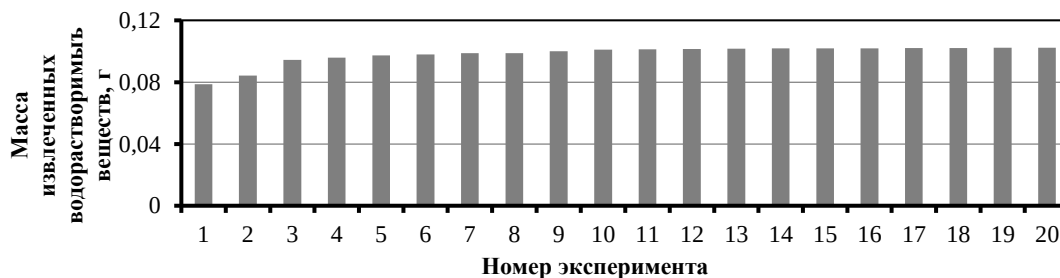


Рис. 5. Процесс доизвлечения сухих веществ из кофейного шлама

Согласно результатам эксперимента, в шламе оставалось 0,65 % экстрактивных веществ, что хорошо согласуется с целью, поставленной в исследовании. Можно говорить о том, что данная технология и аппарат ресурсоэффективны и позволяют повысить резервы использования сырья. Полученный на выходе их экстрактор концентрат жидкого кофе с содержанием сухих веществ 50...60 % представляет собой современный аналог сухого растворимого кофе, при этом сохраняет пищевую ценность продукта и качество сравнимое с натуральным. Исключение этапа сушки позволит значительно повысить энергоэффективность.

Выводы: Проведение производственных испытаний подтверждает научные положения исследований. Микроволновый проточный экстрактор позволяет обрабатывать значительное количество продукта в отличии от образцов микроволновых экстракторов, разработанных в других исследованиях. В зависимости от загрузки массообменных модулей возможно получать на выходе из аппарата экстракт с концентрацией сухих веществ 20 ... 60 %. При прохождении по всей высоте микроволнового экстрактора кассеты с кофе из измельченных зерен удастся извлечь почти все экстрактивные вещества. Данный аппарат можно отнести к энерго- и ресурсоэффективным.

Литература.

1. Процессы переработки кофейного шлама [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская– Киев: «ЭнтерПринт», 2014 – 228 с.
2. Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties / A. Jimenez-Zamora, S. Pastoriza, J.A. Rufian-Henares // LWT - Food Science and Technology – Vol. 61 (2015), P. 12-18
3. Lebovka N. Enhancing Extraction Processes in the Food Industry / N. Lebovka E. Vorobiev, F. Chemat, by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, –2012 – 518 p.
4. F. Chemat, Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice [Text] / F. Chemat, G. Cravotto, Food Engineering Series, 2013, 238 p.
5. Microwave assisted water extraction of plant compounds [Text] / N. Flyrez, E. Conde, H. Domínguez// Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2015 Vol. 90, Is. 4 – P. 590-607
6. Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic antioxidants from grape seeds (Vitis vinifera). / K. Krishnaswamy, V. Orsat, Y. Gariépy, K. Thangavel // Food and Bioprocess Technology. 2013, Vol. 6, P. 441–455
7. Microwave-assisted extraction of Eucalyptus robusta leaf for the optimal yield of total phenolic compounds [Text] / D.J. Bhuyan, Q.V. Vuong, A.C. Chalmers, I.A. van Altena, M.C. Bowyer, C.J. Scarlett// Industrial Crops and Products – Vol. 69 – 2015 – P.1–10
8. Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC / A. Tsukui, H.M. Santos Junior, S.S. Oigman, R.O.M.A. de Souza , H.R. Bizzo, C.M. Rezende // Food Chemistry 164 (2014) P. 266–271
9. Microwave-Assisted Extraction of Inulin from Chicory Roots Using Response Surface Methodology. [Text] / S. Tewari, K. Ramalakshmi, L. Methre, Mohan Rao LJ // J. Nutr. Food Sci.– 2015 – Vol.5, P 342–349

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ

Авдєєва Л.Ю. д-р техн. наук, с.н.с., Макаренко А.А.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HYDRODYNAMIC CALCULATION ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF WATER

Lesya Y. Avdeeva, Andrey A. Makarenko
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Kyiv

Анотація: В статті розглянуті питання, пов'язані із виникненням і розвитком явища гідродинамічної кавітації при обробленні рідких гетерогенних систем. Показана актуальність і практична значимість використання ефектів, що супроводжують гідродинамічну кавітацію. Проаналізовано механізм інтенсифікуючого впливу дії ефектів кавітації в тепломасообмінних процесах. Виявлено недостатність існуючих результатів досліджень, стосовно дії ефектів, пов'язаних із її виникненням при різних гідродинамічних режимах руху рідин. Розглянутий експериментальний стенд для дослідження впливу гідродинамічної кавітації на складні гетерогенні системи. Детально описані геометричні характеристики кавітаційного змішувача на якому проводилися дослідження. На основі експериментальних досліджень показано залежність впливу гідродинамічних характеристик потоку на розвиток гідродинамічної кавітації і інтенсивність змін властивостей водопровідної води. Встановлено закономірності впливу кавітаційних ефектів, що виникають в проточному гідродинамічному змішувачі статичного типу на основні електрохімічні показники водопровідної води в залежності від геометричних характеристик кавітаційного реактора пристрою. Аналіз одержаних даних висвітлив взаємозв'язок геометричних параметрів кавітаційного реактора, гідродинамічною характеристикою течії і ефектами кавітації. Виявлено, що зі збільшенням розміру прохідного діаметру горловини сопла реактора кавітаційний вплив послаблюється. Показано, що використання додаткового місцевого опору у вигляді діафрагми дозволяє посилити кавітаційний вплив на дослідні зразки, покращити гідродинамічні умови проведення процесу і підвищити інтенсивність змін електрохімічних показників. Встановлено, що збільшення тривалості кавітаційного впливу поглиблює зміни властивостей водопровідної води. Визначено поведінку електрохімічних властивостей активованої (катованої) води при витримюванні впродовж 24 годин. Отримані результати дають певну інформацію про електрохімічні властивості водопровідної води.

Abstract: The article deals with issues related to the emergence and development of hydrodynamic cavitation phenomena in the processing of liquid heterogeneous systems. Relevance and practical importance of the use of effects that accompany the hydrodynamic cavitation is shown. The mechanism of influence intensification of cavitation effects in heat and mass transfer processes is analyzed. The lack of existing research results concerning action effects associated with its origin at different hydrodynamic regimes of the fluid is revealed. The experimental stand for a research of influence of hydrodynamic cavitation on difficult heterogeneous systems is considered. Geometrical characteristics of the cavitation mixer on which researches were conducted are in detail described. Based on experimental studies, the impact of the dependence of hydrodynamic flow characteristics at developing the hydrodynamic cavitation intensity and changes in the properties of water is shown. The regularities of influence of cavitation effects, arising in a flow hydrodynamic static mixers, on basic electrochemical performance of water depending on the geometrical characteristics of cavitation reactor unit, are determined. The analysis of the obtained data has covered interrelation of geometrical parameters of the cavitation reactor, the hydrodynamic characteristic of a current and effects of cavitation. It is revealed that with increase in the size of diameter through passage in a mouth of a nozzle of the reactor cavitation influence is weakened. It is shown that the use of additional local support in the form of a diaphragm allows to enhance cavitation effect on

prototypes, improve hydrodynamic conditions of the process and increase the intensity changes of the electrochemical performance. It is established that increasing the duration of exposure aggravates cavitation change the properties of water. Conduct electrochemical properties of activated (tortured) of water in the holding within 24 hours is determined. The results give some information about the electrochemical properties of tap water after cavitation processing.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, інтенсифікація масообмінних процесів, гідродинамічний змішувач статичного типу, електрохімічні властивості

Keywords: hydrodynamic cavitation, intensification of mass transfer processes, static hydrodynamic mixer, electrochemical properties.

Одним з ефективних методів інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів у технологіях для різних галузей промисловості є використання ефектів кавітації. Кавітація – явище розриву суцільності рідини під впливом розтягуючих напружень і утворення заповнених парою і газом порожнин або бульбашок. В результаті різкого зниження тиску нижче за деяке критичне значення $P_{\text{кав}}$ в окремих точках системи або навколо них виникають умови для розриву суцільності рідини і формування каверн, заповнених парою або газом. При різкому підвищенні тиску створюється велика різниця тисків між рідкою і паровою фазами, каверни рухаються із зони низького в зону високого тиску, в результаті чого відбувається їх зростання і зхлопування. Різниця тисків визначає рівень акумульованої в системі потенційної енергії, яка перетворюється в кінетичну енергію радіального руху рідини бульбашки, яка стискається, а при повторній трансформації - в короткочасний імпульс, що поширюється у формі ударної сферичної хвилі. При зхлопуванні каверн безпосередньо поблизу твердих частинок кінетична енергія радіального руху рідини перетворюється на механічну енергію рідкого кумулятивного мікроструменя з великою інтенсивністю впливу. Викид кумулятивного мікроструменя супроводжується виникненням аномально високих локальних тисків, температур, швидкостей і прискорень. Така трансформація енергії сприяє значному підвищенню ефективності динамічного впливу на складні гетерогенні системи [1; 2; 3; 4].

Значення кавітації визначається її проявами, які можна розділити на небажані і позитивні. Некерована кавітація може призвести до серйозних змін роботи обладнання і навіть руйнування конструкції [3; 5; 6]. Однак, в той же час, використання кавітаційних ефектів дозволяє вирішити питання інтенсифікації багатьох технологічних процесів, збільшити їх продуктивність, забезпечити значну економію енерговитрат і високу якість обробки дисперсних систем. Інтенсифікуючий вплив кавітації обумовлений виникненням ряду супутніх ефектів, до них можна віднести ті, що призводять до зміни властивостей і структури матеріалу: механічне руйнування; дифузія, зміна електропровідності і електричного потенціалу, окиснення, відновлення та ін. [7].

На сьогодні вже накопичений значний досвід по використанню гідродинамічної кавітації для інтенсифікації процесів масообміну - перемішування, розчинення, диспергування, емульгування та ін., які відносяться до енерговитратних. Інтенсивність кавітаційного впливу залежить від властивостей середовищ і гідродинамічних умов в потоці, які розрізняються для різних типів місцевих опорів, їх конструктивних особливостей і геометричних характеристик. [1; 2; 4].

При гідродинамічній кавітації в результаті зхлопування бульбашки утворюються іонізовані молекули і вільні радикали, що призводить до активації води, зміни її фізико-хімічних і електрохімічних властивостей. Ці властивості визначають умови проходження багатьох технологічних і біологічних процесів, а також кінцеву якість матеріалу [8; 9]. Через велику різноманітність пристроїв, в яких реалізуються умови для виникнення і розвитку гідродинамічної кавітації існуючі результати, стосовно змін властивостей водних середовищ є неоднозначними.

Мета досліджень – експериментальні дослідження впливу кавітаційних ефектів, що виникають в проточному гідродинамічному змішувачі статичного типу на основні електрохімічні показники водопровідної води в залежності від геометричних характеристик профілю пристрою. Під час виконання досліджень визначались: водневий показник (рН), окислювально-відновний потенціал (ОВП), електропровідність. В дослідженнях використовувалась свіжовідібрана відфільтрована водопровідна вода.

Для проведення досліджень був створений експериментальний стенд на робочій ділянці якого створювався потік рідини певної швидкості і тиску. Стенд змонтований на пересувній платформі і складається з пульту управління, системи відцентрових одноступеневих насосів із запірною арматурою, змінного кавітаційного реактора, діафрагми, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком, циліндричної ємності, з'єднувального трубопроводу та вивідного патрубку.

Кавітаційний реактор представляє собою сопло з геометричними розмірами: діаметр вхідного і вихідного каналу 0,042 м, кут розкриття конфузора 90°, кут розкриття дифузора 120°, довжина горловини сопла 0,020 м. Дослідження проводились при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,004 м, 0,008 м, 0,012 м і 0,016 м. В потоці після соплового пристрою встановлювалась діафрагма, що перекриває перетин потоку на 75% площі.

Водневий показник (рН) характеризує концентрацію вільних іонів водню у воді. Величина рН визначається кількісним співвідношенням у воді іонів H^+ і OH^- , що утворюються при дисоціації води. При розчиненні у воді хімічних речовин або під дією різних видів фізичних впливів співвідношення іонів може бути порушено, що приводить до зміни значень рН.

Результати досліджень визначення рівня рН водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі зі змінними реакторами при поступовому збільшенні тривалості наведені на рис.1.

Одержані результати показують (рис.1), що збільшення тривалості обробки призводить до поступового підвищення рівня рН води на 0,2-0,4 одиниці. Для всіх дослідних зразків найбільші зміни значень відбуваються в результаті першого циклу диспергування, що свідчить про найбільшу ефективність процесу. При збільшенні кількості циклів обробки інтенсивність зростання значень рН поступово знижується. Так, в результаті одного циклу обробки для першого дослідного зразка значення зросло на 2,3%, а в результаті одинадцяти - ще на 3,5%. Одержані дані пояснюються особливостями кавітаційного диспергування в апаратах періодичної дії при якому при кожному послідовному циклі прокачування матеріалу через активну зону рівень кумулятивного впливу кавітаційних бульбашок знижується.

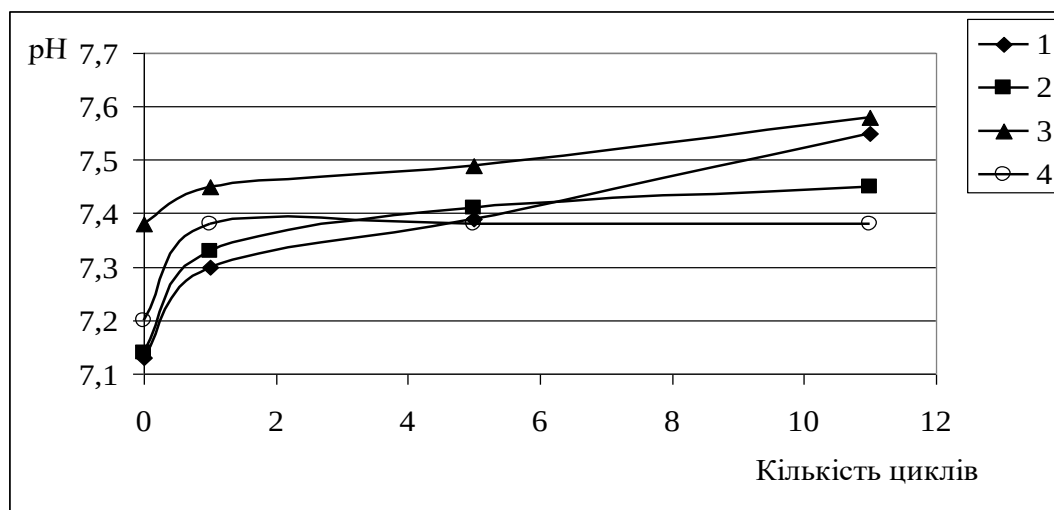


Рис. 1. Залежність значень рН водопровідної води від кількості циклів кавітаційної обробки при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора: 1 - 0,004 м; 2 - 0,008 м; 3 - 0,012 м; 4 - 0,016 м

Аналіз одержаних даних висвітлює взаємозв'язок геометричних параметрів кавітаційного реактора, гідродинамічної характеристики течії і ефектами кавітації. Так, збільшення діаметра сопла з 0,004 м до 0,016 м зменшує швидкість потоку в соплі, збільшує витрати рідини і продуктивність процесу, але зменшує кавітаційний вплив на середовище. Найбільше зростання рН (на 0,4-0,5 одиниць після 11 циклів) спостерігається у зразка, отриманого в результаті обробки в кавітаційному реакторі з діаметром горловини сопла 0,004 м. Зі збільшенням розміру прохідного діаметру горловини сопла реактора кавітаційний вплив послаблюється. Внаслідок цього найменші зміни значень рН відбулися для зразка, отриманого в результаті обробки в реакторі з діаметром горловини сопла 0,016 м. Для цього зразка рівень рН води після 1 циклу і до кінця обробки залишається майже незмінним.

Результати досліджень по визначенню впливу використання діафрагми, що перекриває площу потоку на 75% на зміну рівня рН водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при поступовому збільшенні тривалості наведені на рис. 2. Результати порівнювались з одночасно відібраною контрольною пробовою води, що не проходила обробку.

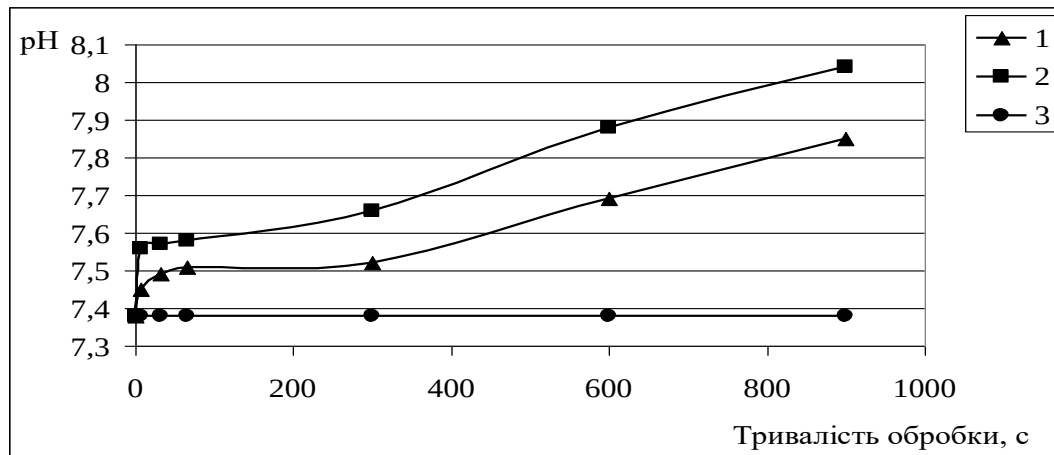


Рис. 2. Залежність значень рН водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора 0,012 м: 1 – без діафрагми; 2 – з діафрагмою; 3 – контрольний зразок без обробки

Результати досліджень (рис. 2) показали, що встановлення діафрагми викликає посилення кумулятивних впливів і зміну властивостей середовища, в т.ч. зміну значень рН дослідних зразків, отриманих в результаті запропонованої обробки. В результаті кавітаційного впливу на дослідний зразок (1) значення рН збільшились на 0,5 одиниць за 900 с обробки. Встановлення діафрагми призводить до покращення умов диспергування і значення рН додатково підвищуються ще на 0,2 одиниці при тій же тривалості впливу на зразок. Збільшення тривалості обробки посилює інтенсивність впливу кавітаційних ефектів на цей показник. Таким чином, наявність регулюючої діафрагми дозволяє суттєво впливати на умови виникнення і розвитку кавітаційних ефектів.

Інший показник, що дозволяє охарактеризувати електрохімічні зміни у воді під впливом кавітаційної обробки – окислювально-відновний потенціал (ОВП). Він характеризує ступінь активності електронів в окислювально-відновних реакціях і має значний вплив на функціонування електроактивних компонентів клітин біологічних систем. Найбільшою окислювальною здатністю характеризується кисень, а відновною – водень. В організмі людини ОВП внутрішнього середовища клітин в нормі завжди менше нуля і значення знаходяться в межах від – 60 мВ до – 200 мВ. У природній воді значення ОВП коливаються від – 400 мВ до +700 мВ, середньому від +100 до +500 мВ. Для її засвоєння організмом людини необхідно витратити енергію на корекцію активності електронів. Результати досліджень ОВП водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при різних діаметрах горловини сопла наведені на рис.3.

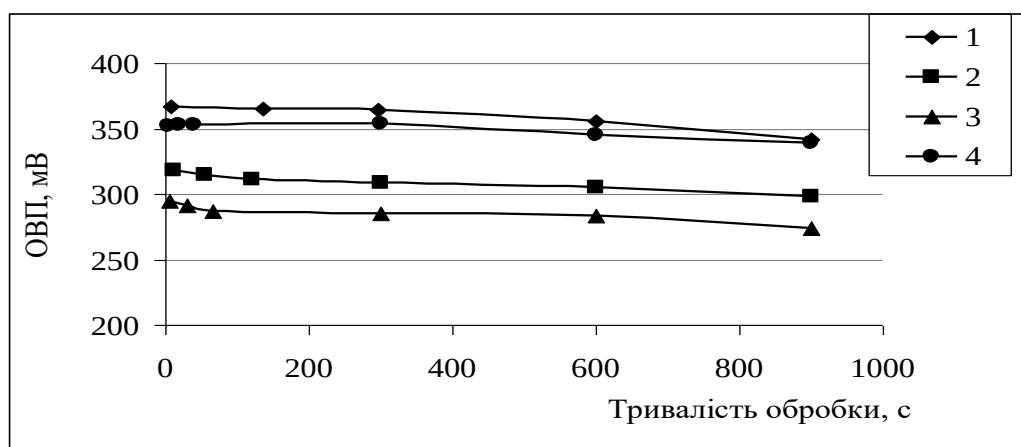


Рис. 3. Залежність значень ОВП водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки при діаметрі горловини змінного кавітаційного реактора: 1 – 0,004 м; 2 – 0,008 м; 3 – 0,012 м; 4 – 0,016 м

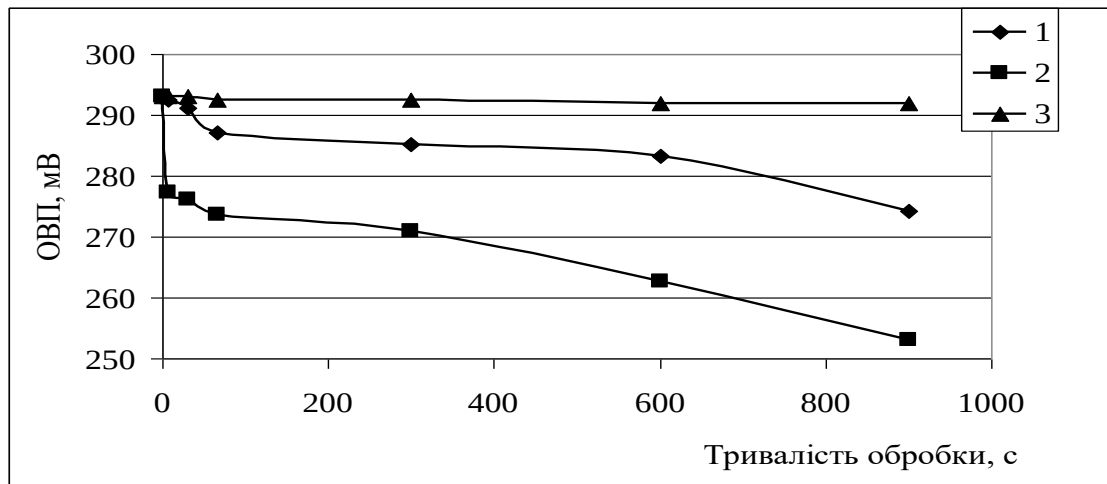


Рис. 4 – Залежність ОВП водопровідної води від тривалості кавітаційної обробки в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини сопла змінного кавітаційного реактора 0,012 м: 1 – без діафрагми; 2 – з діафрагмою; 3 – контрольний зразок без обробки

Отримані результати (рис.3) дозволили охарактеризувати вплив кавітаційних ефектів, що виникають під час запропонованої обробки на ОВП води. Вже в результаті короточасного впливу при першому циклі оброблення води спостерігається зниження рівня ОВП для всіх дослідних зразків. Посилення кавітаційного впливу за рахунок збільшення тривалості обробки призводить до поступового зниження значень цього показника. Так, за 15 хв. обробки значення знизились на 6,5-7%. В той же час, наведені залежності показали, що зміна діаметра горловини сопла реактора даної конструкції змішувача не впливає на інтенсивність зміни значень ОВП.

Таким чином, було встановлено, що ефекти викликані дією гідродинамічної кавітації дозволяють знизити показники ОВП, що в свою чергу призводить до покращення біоенергетичних, метаболічних і імуностимулюючих властивостей води.

На рис. 4 наведені результати досліджень по визначенню впливу діафрагми, що перекриває площу потоку на 75% на ОВП водопровідної води після обробки в кавітаційному змішувачі при поступовому збільшенні тривалості впливу. Одержані результати порівнювались з контрольною пробою води, що не проходила обробку.

Аналіз одержаних даних (рис.4) підтверджує висновки попередніх досліджень про значний вплив діаметра горловини сопла на зміну гідродинамічних умов проведення процесу, виникнення явища кавітації і дію супутніх ефектів на властивості дослідних систем. Порівняння значень ОВП зразків води, отриманих в результаті обробки в кавітаційному апараті з використанням діафрагми і без неї, показало сприяння її встановлення протіканню кавітаційних ефектів. Використання діафрагми посилює вплив на дисперсійне середовище, що призводить до більш інтенсивної зміни значень ОВП. Обробка зразка без діафрагми зменшує значення ОВП на 20 одиниць, а її використання зменшує ці значення ще у 2 рази, порівняно до контрольного.

Посиленню впливу кавітаційних ефектів на дослідні зразки також сприяє збільшення тривалості обробки. Так, при обробці впродовж 66 с спостерігається зменшення значень ОВП на 2%, а в результаті оброблення впродовж 900 с - ще на 4,5%. Таким чином, доведено позитивний вплив гідродинамічної кавітації на ОВП води.

Для визначення тривалості збереження електрохімічних властивостей дослідних зразків активованої води були проведені дослідження з визначення зміни їх значень при витримуванні після кавітаційної обробки впродовж 24 год. Результати вимірювань порівнювались з одночасно відібраною контрольною пробєю, що не проходила обробку. Отримані результати показали, що активована (кавітована) вода, одержана на експериментальному кавітаційному апараті, зберігає свої властивості впродовж не більше 24 год. Збільшення тривалості кавітаційної обробки сприяє підвищенню значень рН і накопиченню груп ОН⁻. Наявність діафрагми дозволяє збільшити ефективність кавітаційного впливу під час процесу обробки, а також сприяє більш повільному зниженню інтенсивності зміни показника рН впродовж зберігання. Причому, чим більше енергії

витрачається в процесі обробки, тим менше змінюються його властивості в подальшому в процесі витримки.

Результати досліджень ОВП після витримки дослідних зразків впродовж 24 год. підтвердив висновки попередніх досліджень і показав, що збільшення тривалості знаходження дослідних зразків в зоні гідродинамічної кавітації посилює активний вплив на середовище, в т.ч. призводить до зменшення значень ОВП і збільшення активності електронів. Визначення показника ОВП через 24 год. показали, що витримка всіх зразків призводить до подальшого зменшення показників ОВП у всіх зразках. Причому, чим більше енергії витрачається в процесі обробки за рахунок збільшення тривалості процесу, тим більші зміни властивостей відбуваються зі зразком під час обробки і тим менше він змінюється в подальшому в процесі витримки. Так, найменші зміни під час витримки відбулися зі зразком, який був оброблений в апараті з діафрагмою впродовж 900 с. Значення ОВП дослідного зразка, одержаного при обробленні впродовж 300 с через 24 год. витримування наближаються до значень контрольного зразка води, що не проходив обробку, на відміну від значень інших дослідних зразків.

Висновки.

Проведеними дослідженнями доведений взаємозв'язок між характеристиками гідродинаміки потоку, виникненням і розвитком гідродинамічної кавітації і впливом викликаних ефектів, що викликає ту чи іншу інтенсивність зміни властивостей, в т.ч. значень електрохімічних показників водопровідної води. Показано, що використання додаткового місцевого опору у вигляді діафрагми, що перекриває потік на 75% дозволяє посилити кавітаційний вплив на дослідні зразки, покращити гідродинамічні умови проведення процесу і підвищити інтенсивність змін електрохімічних показників. Встановлено, що збільшення тривалості обробки поглиблює зміни властивостей водопровідної води і впливає на зміну значень при витримванні впродовж 24 годин.

Література

1. Перник А.Д. Проблемы кавитации. Москва: Судостроение, 1966. 439 с.
2. Gogate P.R., Pandit A.B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2005. №12. P. 21–27.
3. Young F.R. Cavitation. London: Imperial College Press, 1999. 418 p.
4. Braeutigam P., Franke M., Zhi-Lin Wu, Ondruschka B. Role of Different Parameters in the Optimization of Hydrodynamic Cavitation. *Chem. Eng. Technol.*, 2010,33. No. 6. P. 932–940.
5. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: ТДТУ ім.І.Пулюя, 2009. 220 с.
6. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. Москва.: Машгиз., 1975. 336 с.
7. Саркисов Г.Н. Структурные модели воды. УФН. 2006, Т.176. №8. С.833-845.
8. Долинский А.А., Басок Б.И. Наномасштабные эффекты при дискретно-импульсной трансформации энергии / Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: темат. зб. статей / под общ. Ред..А.А.Долинского; И-т технической теплофизики НАН Украины. Киев.: Академперіодика, 2015. С. 422-437.
9. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А. Вода в условиях обработки ДИВЭ / Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: темат. зб. статей / под общ. Ред..А.А.Долинского; И-т технической теплофизики НАН Украины. Киев: Академперіодика, 2015. С.292-299.

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРАЦІЙНО-ОКИСНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ РОТОРНОГО ТИПУ НА ПРОЦЕС ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ.

Ободович О.М. д.т.н., с.н.с., Сидоренко В.В., к.т.н.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України,
Київ

INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE AND HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE AERIAL-OXIDIZING ROTARY TYPE INSTALLATION ON THE DRINKING WATER DISCHARGE PROCESS

Obodovych O. M., Sydorenko V. V.

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of
Ukraine, Kyiv

Анотація: В даний час для питного водопостачання використовується все більше води з артезіанських свердловин (підземні води). Це пов'язане з погіршенням екологічної обстановки в Україні, яка призвела до зараження поверхневих вод важкими металами, радіоактивними елементами, нітратами, нітритами і т. ін. На більшості підприємств харчової промисловості для технологічного водозабезпечення також використовуються підземні води. Одним з основних недоліків підземних вод є підвищений вміст в них заліза. Зважаючи на це, важливою задачею в процесі водопідготовки залишається пошук, розробка та впровадження ефективних та енергоощадних способів знезалізнання підземних вод питного призначення. В статті наведені результати досліджень по обробці артезіанської води в аераційно-окиснювальній установці роторного типу з метою знезалізнання. Представлена схема та принцип роботи установки. Експериментально визначено вплив конструктивних параметрів аератора-окиснювача на швидкість знезалізнання.

Abstract: Currently, for drinking water treatment the more water from artesian wells (ground water) is used. This is due to the deterioration of ecological situation in Ukraine, which led to the contamination of surface water with heavy metals, radioactive elements, nitrates, nitrites, and so on. Most of the food industry for process water supply also uses groundwater. One of the major drawbacks of groundwater is the high content of iron. Therefore, an important task in the process of water treatment is the search, development and implementation of effective and energy efficient iron removal methods from groundwater for drinking purposes. The article presents the results of research on the treatment of artesian water in aeration-oxidizing setup of rotor type for the purpose of iron removal. The scheme and the principle of the setup is presented. Experimentally, the influence of design parameters of aerator-oxidizer for iron removal rate is determined.

Ключові слова: знезалізнання, аерація, дискретно-імпульсне введення енергії, аератор-окиснювач.

Key words: iron removal, aeration, discrete – pulse energy input, aerator-oxidizer.

Вступ

В даний час для питного водопостачання використовується все більше води з артезіанських свердловин (підземні води) [1]. Це пов'язане з погіршенням екологічної обстановки в Україні, яка призвела до зараження поверхневих вод важкими металами, радіоактивними елементами, нітратами, нітритами і т. ін. На більшості підприємств харчової промисловості для технологічного водозабезпечення також використовуються підземні води. Одним з основних недоліків підземних вод є підвищений вміст в них заліза [2]. Зазвичай вміст заліза в артезіанських водах складає від 1 до

5 мг/л. При вмісті заліза більш ніж 1 мг/л вода набуває бурого кольору, "залізний" присмак. Сполуки заліза та залізобактерії відкладаються у водопроводах та зменшують їх пропускний перетин [3]. За стандартом на питну воду, вміст заліза не повинен перевищувати 0,3 мг/л. Для багатьох галузей промисловості, наприклад, виробництва натурального та віскозного шовку, напівпровідників, лікєро-горілочаних виробів, граничний вміст заліза не повинен перевищувати 0,05 мг/л.

Для знезалізнєння води використовують різноманітні методи. Дослідження проводяться в декількох основних напрямках, серед яких слід відзначити мембранні, сорбційні, біологічні. Проте аерація залишається найбільш поширєним [4]. Ефективність інших методів зростає за умови інтенсивної аерації [5]. Ефективність аераційного очищення води від заліза залежить від гідрравлічних та масообмінних характеристик аеруючого пристрою.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Рішення загальної задачі інтенсифікації технологічних процесів зводиться до впливу на систему зовнішніх фізичних факторів, що дозволяють змінити в потрібному напрямку стан системи та швидкість протікання в ній процесу тепло-та масопереносу. Завдання перетворєння енергії, що вводиться в гєтерогєнну систему типу «тверде тіло-рідина», «рідина-рідина», «газ-рідина» і «тверде тіло-рідина-газ», яке забезпечує не тільки ефективну її трансформацію, а й активацію внутрішніх джерел енергії в самому середовищі, вирішується методом дискретно - імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Механізми ДІВЕ були теоретично досліджені в роботі [6], а технологічні та інженєрні аспекти цього принципу представлені в [7] і узагальнені в [8]. Принцип методу полягає в перетворєнні енергії (теплової, механічної, електричної, електромагнітної і ін.), що вводиться в середовище, в короткі імпульси, дискретно розподілені у всьому робочому об'ємі. Із загальної кількості апаратів, що реалізують метод ДІВЕ слід виділити роторно - дискові і роторно - пульсаційні апарати (РПА), близькі за принципом дії, але мають певні відмінності.

Для циліндричного апарату характерні, як правило, щільні канали прямокутного перетину, в дисковому апараті, поряд з прямокутними доцільно застосування канали круглого перетину, причому довжина каналів може істотно відрізнитися між собою. На відміну від циліндричних РПА насосний ефект в апаратах дискового типу відсутній і переміщення рідини відбувається тільки за рахунок прикладеного зовнішнього перепаду тиску. Доцільність застосування методу ДІВЕ для інтенсифікації технологічних процесів, пов'язаних з масообмінними процесами, викладєна в значній кількості робіт, що розглядають процеси перемішування, гомогєнізації, диспергування, емульгування, екстракції, розчинєння і ін.

Мета дослідження

Метою даної роботи є дослідження впливу конструктивних та гідродинамічних параметрів аераційно-окиснювальної установи роторного типу на процес знезалізнєння підземних вод питного призначєння.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження слугувала вода з артезіанських свердловин з вмістом заліза від 1 до 10 мг/л.

Установка складається з наступних блоків: реактора, аератора-окиснювача, контуру рециркуляції, контуру циркуляції холодоагенту, блоку управління і контролю, вимірювальної апаратури, окиснювально-фільтраційної колонии.

Реактор є резервуаром з внутрішнім діаметром циліндричної частини 0,42 м, висотою 0,48 м, нижньої конічної частини з висотою 0,2 м, верхнім діаметром 0,42 і нижнім - 0,05 м, корисним об'ємом 60 л і служить для проведення процесу обробки рідини.

З метою підтримки постійної температури процесу, в реакторі передбачєна сорочка охолодження (нагрівання), що містить вхідний і вихідний патрубки для під'єднання до водопровідної мережі. Нагрівання води в сорочці здійснювалося через водонагрівач проточний Thermix Stream 350 White. Для визначєння рівня заповнення реактора служить винєсєний рівнемір. Усєредині реактора може бути передбачєний знімний внутрішній циліндр, призначєний для прийому оброблюваної рідини з системи рециркуляції.

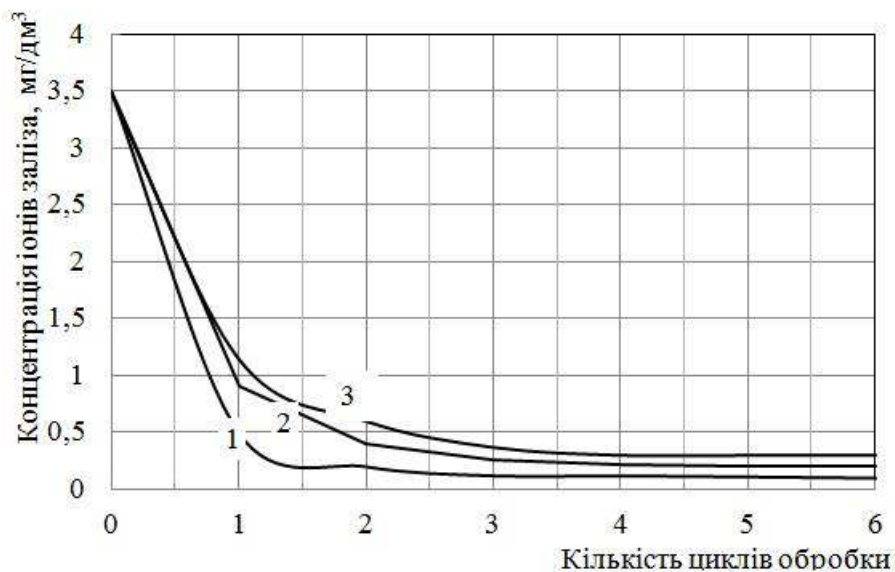
Рис. 1. Апаратурно – технологічна схема експериментальної аераційно-окиснювальної установки

Під час рециркуляції суміші відкривають двоходовий кран, через який за рахунок розрідження, створеного у всмоктуючому трубопроводі, надходить повітря з атмосфери. Таким чином, рідина насичується повітрям. Отримана суміш направляється в робочу камеру аератора-окиснювача, де піддається обробці методом ДІВЕ. Після аератора-окиснювача суміш диспергованих в рідині бульбашок повітря (газова емульсія) надходить в трубовід і поступає в нижню частину

окиснювально-фільтраційної колони. Проходячи через шар пенополістеролу, рідина виходить з колони і подається до збірника готової продукції. У разі недостатнього очищення рідина може рециркулювати по замкнутому контуру: реактор – аератор-окиснювач – окиснювально-фільтраційна колона – реактор кілька разів, а потім подаватися до збірника готової продукції. При рециркуляції, рідина надходить назад в реактор, проходячи через розпилювальну головку.

Результати та обговорення

Одним з показників, які впливають на гідродинамічну обстановку всередині аератора-окиснювача є кутова швидкість обертання ротора. При проведенні експерименту кутову швидкість ротора міняли з 35 до 55 об/с. Початкова концентрація іонів заліза в об'єкті дослідження складала 3,5 мг/л. Графік зміни концентрації іонів заліза в воді від кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання ротора представлений на рис.2.



1 – 55; 2 – 45; 3 – 35 об/с.

Рис. 2. Залежність зміни концентрації іонів заліза в воді від кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання роторно-пульсаційного вузла

З рис. 2 видно, що обробка води в аераторі-окиснювачі дозволяє ефективно знижувати концентрацію іонів заліза у воді. Так, при кутовій швидкості обертання ротора 55 об/с концентрація іонів заліза за один прохід води через робочі органи апарата (один цикл) знижується з 3,5 до 0,25 мг/л. Зі зменшенням кутової швидкості від 45 та 35 об/с необхідно збільшувати кількість циклів обробки для досягнення бажаного результату (не більше 0,3 мг/л).

Висновки

Аераційно-окиснювальну установку роторного типу можна ефективно використовувати для очищення води від іонів заліза, керуючи гідродинамічними параметрами та змінюючи конструкційні особливості роторно-пульсаційного вузла аератора-окиснювача можна регулювати динаміку і якість очищення артезіанських вод від сполук заліза.

Швидке знезалізнєння пояснюється тим, що вода, збагачена киснем повітря в процесі очищення потрапляє в робочі органи апарата (ротор-статор-ротор). Водно-повітряна суміш проходить скрізь щільні отвори та зазори роторно-пульсаційного вузла піддається дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, котрі викликають на міжфазних поверхнях нестійкості Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, значному збільшенню сумарної поверхні контакту фаз і підвищенню процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти, зазвичай, недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середовищ навіть при значно більшому рівні питомих енерговитрат.

Література

1. Драгинский В.Л. Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений / В.Л. Драгинский // Водоснабжение и сантехника. – 1997. – №12. – С.16–18.
2. Кирюхин В.А. Общая гидрогеология [Текст] / В.А. Кирюхин. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2008. – 439 с.
3. McNeill, L.S., Edwards M. (2001). Iron pipe corrosion in distribution systems. Journal - American Water Works Association, 93(88), 88–100.
4. Водоподготовка: Справочник [Текст] / Под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
5. Munter R., Ojaste H., Sutt J. (2005). Complexed Iron Removal from Groundwater. Journal of Environmental Engineering, 131, 1014–1020.
6. Долинский, А. А. Принципы разработки новых энерго-ресурсо-сберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии [Текст] / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19, №4 – 5. – С. 13–25.
7. Долинский, А. А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий [Текст] / А.А. Долинский. // ИФЖ. – 1996. – Т. 69, №6. – С. 35–43.
8. Накорчевский, А.И. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов [Текст] / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок, Т.С. Рыжкова. // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 2. – С. 58–68.

УДК 663.243

**ВИКОРИСТАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО БЛАНШУВАННЯ
СИРОВИНИ В ПРОЦЕСІ ЕКСТРАГУВАННЯ
ЧОРНИЙ В.М., ПРИЩЕПА Ю.Ю., ЛАПІНА Н.В. студенти, МИСЮРА Т.Г.,
ПОПОВА Н.В. канд. техн. наук, доценти
Національний університет харчових технологій, м. Київ**

**USE PREVIOUS BLANCHING OF RAW MATERIALS IN
EXTRACTION PROCESS
CHORNYI V., PRYSHCHЕРА Y., LAPINA N. Students, MISYURA T.,
POPOVA N. Ph.D. docents
National University of Food Technologies, Kyiv**

Анотація: Метою дослідницької роботи було порівняння ефективності вилучення цільових компонентів під час екстрагування рослинної сировини із передбаченням парової обробки матеріалу перед його переробкою. Відомо, що вплив гострої пари несе структурно-механічні зміни колоїдних капілярно-пористих тіл, які можуть вдало використовуватися для інтенсифікації процесів масоперенесення. Для проведення експериментів взято цвіт кінського каштану, як фармацевтично цінна сировина для виробництва і використання екстрактів з неї. В роботі наведена коротка характеристика сировини. В якості екстрагентів обрано два різнополярні розчинники для повнішого аналізу проходження процесу. Параметри пропарювання та екстрагування фіксовані, щоб отримати точну можливість порівняння ефективності застосування парообробки. Для визначення ефективності попередньої обробки, результати експериментів порівнювалися із значеннями отриманими від контрольних зразків. Бланшування проводилось в лабораторному пропарнику, екстрагування здійснювалося з внесенням низькочастотних коливань за допомогою вібростенда, використання яких відоме своєю високою ефективністю. Показник, який визначав кількісну характеристику проходження процесу була масова частка сухих речовин в екстракті, що визначався рефрактометричним методом. Отримано результати експериментів, які підтверджують доцільність проведення попереднього бланшування сировини перед

215

екстрагуванням, яке значною мірою пришвидшує процес. За цими результатами побудовані графіки залежностей з кривими експоненціального типу. Розглянуто теоретичне обґрунтування підвищення масопередачі завдяки попередній підготовці матеріалу. Визначено, що вилучення водорозчинних сполук із цвіту кінського каштану менше ніж вихід речовин, які розчинялися спиртом за тих самих умов. Отримані результати можуть бути використані для інтенсифікації масообмінних процесів, зміни апаратурно-технологічного оформлення виробництва екстрактів, подальших глибших наукових досліджень застосування попередньої обробки сировини.

Abstract: The purpose of research comparing the effectiveness of withdrawal stipulated target components during the extraction of plant material with anticipation steam treatment of the material before processing. It is known that exposure to sharp steam is structural and mechanical changes colloidal capillary-porous materials that are successfully used for the intensification of mass transfer. For the experiments taken blossom of aesculus as pharmaceutically valuable raw material for the production and use of extracts from it. In the work is a short description of raw materials. As extractants selected two heteropolar solvents for a fuller analysis of the process. Steaming and extraction parameters are fixed, the possibility to get an accurate comparison of the effectiveness of steam processing. For determining the effectiveness pretreatment experimental results were compared with values obtained from control samples. Blanching was performed in a laboratory steamer, extraction was carried out with the introduction of low-frequency vibrations via vibration. An index that determines a quantitative description of the passage of the process is the mass fraction of solids in the extract that was determined refractometric method. The results of experiments confirming the feasibility of a blanching prior to extraction of raw materials, which greatly speeds up the process. According to these results created graphs dependency with of exponential type curve. The theoretical justification for increasing the mass transfer due to previous preparation material. Determined that the removal of soluble compounds with blossom of aesculus less than the output of substances dissolved spirit under the same conditions. The results can be used for intensification of mass transfer processes, changes of technological design of production of extracts further deeper of scientific research use of pretreatment of raw materials.

Ключові слова: екстрагування, бланшування, інтенсифікація, кінський каштан, попередня обробка сировини.

Keywords: extraction, blanching, intensification, aesculus, pretreatment of raw materials.

Важливим напрямком підвищення показників економічної діяльності підприємств харчової, фармацевтичної та переробної промисловості є введення нових енерго- і ресурсозберігаючих технологій переробки сировини, яка забезпечує високу якість готової продукції. До перспективних методів інтенсифікації масообміну відносять внесення низькочастотних механічних коливань в середовище проходження процесу. Відомо, що використання низькочастотних механічних коливань під час екстрагування рослинної сировини підвищує швидкість досягнення результату та кількісний вихід цільових компонентів при низьких енергозатратах. Тому об'єктом наших досліджень був процес віброекстрагування, який запропоновано інтенсифікувати за допомогою проведення попереднього бланшування сировини перед її безпосередньою переробкою [1, 2].

В якості сировини для дослідження було обрано цвіт кінського каштану. Кінський каштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*) — отруйна багаторічна рослина, поширена лікарська, медоносна та декоративна культура. Суцвіття — прямостояча, пірамідальна волоть, 10-30 см заввишки, складається з 20-50 квіток. Квітне в травні-червні протягом 15 діб. В квітках виявлено пектинові і дубильні речовини, флавоноїди, рутин, слиз. Найціннішим із флавоноїдів є — квертецин, котрий стимулює процеси тканинного обміну, тонізує серцево-судинну систему, нормалізує тиск, знижує холестерин, набряки, діє як ранозагоюючий засіб. Також належить до сильних антиоксидантів. Найбільш відома фармакологічна дія цієї рослини, беззаперечно визнана офіційною медициною, — венотонізуюча. Їх застосовують при тромбофлебитах, геморагічному діатезі, початкових формах варикозного розширення вен. Водно-спиртовий екстракт, відомий під назвою «Ескузан», застосовують як венотонізуючий засіб і антикоагулянт. В народній медицині сік або настоянку квіток вживають всередину для лікування геморою, варикозного розширення вен, тромбофлебиту, атеросклерозу (позитивно впливає на обмін холестерину). Спиртові настоянки сухих квітів кінського каштану застосовують зовнішньо при ревматичних та артритних болях [3].

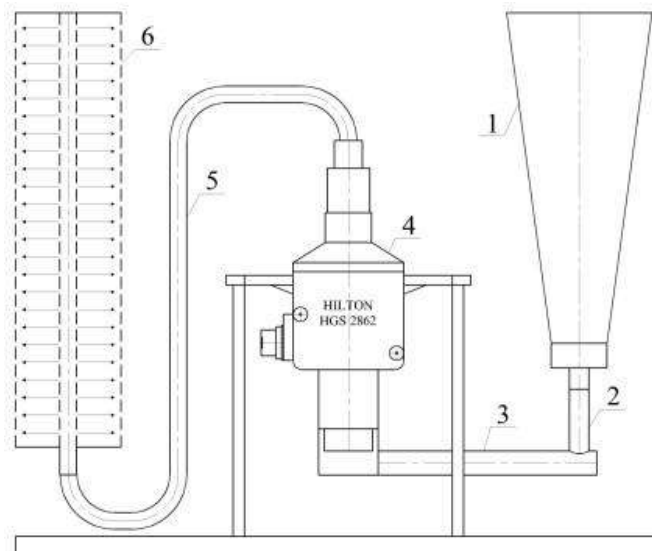
Для дослідження цвіт взято без основи суцвіття. Цвіт перед проведенням експериментів сушився. Це необхідно для його подальшого довгострокового зберігання та використання у виробничих умовах, коли можлива його переробка не лише сезонна. Подрібнення даної рослинної

сировини не доцільне через її вже досить вигідну форму пластини пелюсток, що збільшує сумарну поверхню контакту фаз для зовнішньої дифузії [4].

Метою наших досліджень було дослідити процес вилучення розчинних речовин з матеріалу шляхом екстрагування та інтенсифікувати його завдяки попередньому бланшуванню сировини. Щоб зробити висновки, результати порівнювали з контрольними паралельними дослідями, в яких сировину не піддавали пароперобробці.

Використання гострої пари дозволяє розширити пори клітин капілярно-пористого тіла. За рахунок цього впливу клітина матеріалу зазнає різних структурно-механічних змін пов'язаних з розширенням пор через підвищення високої температури, швидкого насичення вологою, часткового руйнування клітини. Пара, яка легше проникає до клітини, на відмінну від рідини, з причини свого агрегатного стану, крім цього краще розчіплює комплекси сполук, які зв'язуються з вологою та виводяться із клітини екстрагентом. На шляху проходження пари до клітини капілярами матеріалу, за рахунок високої температури та тиску, що переноситься агентом, сприяє розширенню капілярів. Цей ефект покращує міжклітинну дифузію, що інтенсифікує швидкість виведення цільових компонентів рідким екстрагентом до граничного шару контакту фаз «тверде тіло-рідина». Виведення розчинних компонентів із клітини та міжклітинного простору розширеними порами та капілярами проходить краще за рахунок низького гідралічного опору, який створюється стінками капілярів.

Сировина пропарювалася протягом п'яти хвилин на лабораторному пропарювачі, схема якого показана на рисунку 1. Наповнювалася ємність для води 1, далі дозатором 2 та з'єднувальною трубкою 3 вода надходить в паровий котел 4. Пара, що утворилася в котлі надходила трубкою 5 в ємність із сировиною 6, в якій рослинний матеріал піддавався бланшуванню.



1 — ємність для води; 2 — дозатор води; 3,5 — з'єднувальні трубки;
4 — паровий котел; 6 — ємність для сировини.

Рис.1. Схема пропарювача.

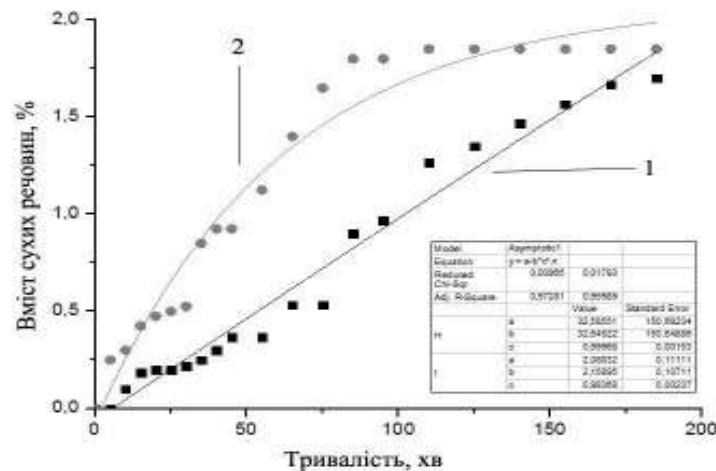
За період бланшування, сировина завдяки своїм сорбційним властивостям насичувалася вологою та збільшувала свою масу від 2,1 до 2,3 разів. За попередніми дослідженнями вияснено, що при збільшенні тривалості бланшування більше п'яти хвилин, маса зразку не збільшувалася. Це пояснюється тим, що матеріал досягає свого сорбційного піку та не спроможний поглинати більше води. Тому нами обрано саме такий економічно-доцільний час пропарювання.

Після цього направлялася на екстрагування. У наших дослідженнях використано два різних за полярністю екстрагента для порівняння результатів кількісного виходу сухих речовин. Такими екстрагентами були вода та спирт концентрацією – 90%об. Були обрані однакові параметри для екстрагування. Температура середовища складала – 22°C, гідромодуль – 15. Гідромодуль визначався, як необхідна кількість для повного змочування сировини з урахуванням її подальшого

набухання. Екстрагування проводилось в скляній посудині із внесенням в середовище механічних коливань частотою 1,5 Гц, при амплітуді 12 мм, які створював вібростенд.

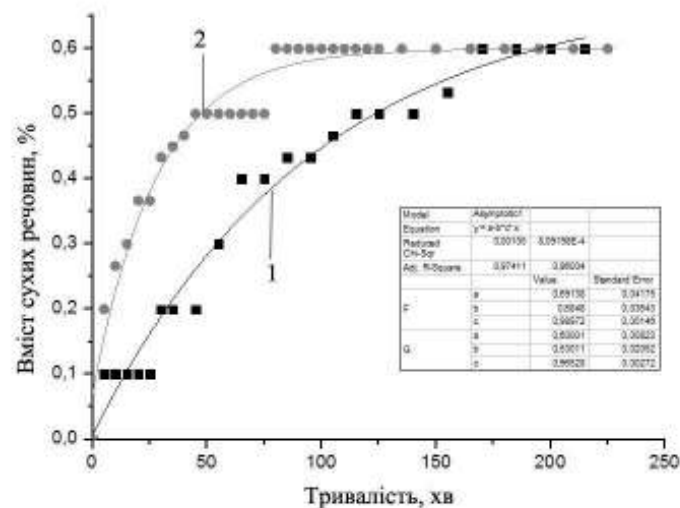
В ході процесу визначався вміст сухих речовин у екстрактах рефрактометричним методом. Проби відбиралися з різною частотою, це було необхідним з розрахунку на те, що масоперенесення в початковий період екстрагування є найбільше та з часом зменшується у зв'язку з постійним виснаженням сировини, вихід сухих речовин асимптотично наближається до рівноважної лінії. Тому перші 30 хвилин вирішено відбирати проби з частотою 5 хвилин, наступну годину кожні – 10 хвилин, в кінцевий період процесу періодичність відбору складала 15 хвилин.

Отримані результати експериментів висвітлені на графіках наведених далі. Можемо спостерігати, що виснаження сировини, яка проходила попередню обробку виявляється швидшим [5]. Це можна обґрунтувати зменшенням гідравлічного опору розширених парою капілярів, який долає екстрагент при масообмінних процесах та скороченням стадії набухання матеріалу за рахунок поглиненої вологи пару. Також з графіків видно, що вихід сухих речовин при екстрагуванні спиртом є більшим та досягає 1,8%, на відміну від екстрагенту води – 0,6%.



1 — без пропарювання сировини; 2 — з пропареною сировиною.

Рис.2. Результати екстрагування спиртом.



1 — без пропарювання сировини; 2 — з пропареною сировиною.

Рис.3. Результати екстрагування водою.

Представлена робота може бути цікавою для подальшого її розвитку та доповнення результатами досліджень. Надалі планується дослідити вплив попередньої парової обробки сировини на перебіг процесу екстрагування при різних параметрах бланшування, використанні

різної сировини, що має відмінну форму та структуру, введенню додаткових параметрів екстрагування.

Висновки.

Виходячи з результатів експериментів можна зробити висновки, що попереднє бланшування сировини пришвидшує процес екстрагування. При використанні води в якості екстрагента, швидкість екстрагування збільшується в 2,1 рази. При використанні спирту, швидкість процесу збільшується в 2,3 рази. Тобто, щоб інтенсифікувати процес екстрагування можна рекомендувати проведення попереднього пропарювання сировини гострою парою.

Література.

1. Лысянский В.М. Определение коэффициента массоотдачи в диффузионном аппарате // Сахарная промышленность. - 1960. - № 12. - С. 13 – 20.
2. Зав'ялов В.Л., Лобода П.П., Бодров В.С. Механізм та особливості процесу віброекстрагування рослинної сировини // Наук. праці НУХТ. - 2002. - № 12. - С. 74 – 77.
3. Кочеткова А.А. Функциональные продукты в концепции здорового питания // Пищевая промышленность. - 1999. - № 3. - С. 4 – 5.
4. Пономарев В.Д. Экстрагирование лекарственного сырья. – М.: Медицина, 1976. – 274 с.
5. Эйгенсон Л.С. Моделирование. – М.: Советская наука, 1982. – С. 347 – 356.

УДК 663.243

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСТОЮВАННЯ ПЛОДІВ КИЗИЛУ

**СТЕПАНЧУК М.С., ЛАПІНА Н.В., ЧОРНИЙ В.М., студенти,
МИСЮРА Т.Г., ПОПОВА Н.В. канд. техн. наук, доценти
Національний університет харчових технологій, м. Київ**

INVESTIGATION OF CORNELL FRUIT INFUSION
STEPANCHUK M., LAPINA N., CHORNYI V., students, MISYURA T., POPOVA
N. Ph.D. docents
National University of Food Technologies, Kyiv

Анотація: Метою дослідницької роботи передбачено дослідження процесу вилучення цільових компонентів під час настоювання рослинної сировини із передбаченням подрібнення матеріалу перед його переробкою. Відомо, що подрібнення застосовують для інтенсифікації процесів масоперенесення за рахунок збільшення сумарної поверхні фази. Запропоновано використання отриманих настоїв в технології безалкогольних напоїв при приготуванні цукрових сиропів. Визначено доцільність використання настоїв з сировини, яка має привабливі органолептичні показники та в змозі надати продукту функціонального значення. Для проведення експериментів взято сушені поди кизилу, як сировина, що здатна задовольнити потреби якості настою. В якості екстрагенту обрано воду з погляду на її подальше використання в приготуванні сиропу. Прийнято найвпливовіші фактори, якими передбачається управляти процесом. Рівні варіювання цих факторів обрано з розрахунку на попередній огляд літератури. Настоявання проводилось в колбах на водяній бані, яка дозволяла управляти температурою середовища. Показник, який визначав кількісну характеристику проходження процесу була масова частка сухих речовин в настой, що визначався рефрактометричним методом. Показник, який відображав якісну характеристику готових настоїв була масова частка аскорбінової кислоти, що визначалася йодометричним методом. Отримано результати експериментів, на основі яких побудовані поверхні відгуку та розроблено математичні моделі процесу. Визначено, що вилучення водорозчинних сполук із плодів кизилу має різну величину та якісний склад, а саме вміст вітаміну С. На основі результатів математично-статистичної обробки знайдено оптимальні режими настоювання.

Abstract: The purpose of the research envisaged research process extracting target components during infusion of plant material using predictive grinding material before processing. It is known that grinding is used for intensification of mass transfer due to increasing the total surface of phase. The use of infusion derived technology in the preparation of soft drinks in the preparation of sugar syrups. Determined the

feasibility of using infusion of raw materials has attractive organoleptic parameters and able to give the product functional significance. For experiments taken fresh cornel as raw materials that able to meet the needs of quality infusion. As extractant selected water in view of its continued use in the preparation of syrup. It is the most influential factors that are supposed to manage the process. Varying levels of these factors is selected based on a preliminary review of the literature. Infusion conducted in flasks in a water bath, which allows to control the temperature of the environment. An index that determines a quantitative description of the passage of the process is the mass fraction of solids in the infusion which was determined by refractometric method. An index that reflects the qualitative characteristics of infusions was the mass fraction of ascorbic acid was determined by iodometric method. The results of experiments based on which constructed surface response and mathematical models of the process. Determined that the removal of soluble compounds from cornel fruit has a different value and qualitative composition, such as vitamin C.. On the basis of mathematical-statistical analysis found optimal modes of infusion.

Ключові слова: настоювання, кизил, цукровий сироп.

Keywords: extraction, infusion, cornel, sugar syrup.

В даний час особливу актуальність набуває проблема вдосконалення технологій і розширення асортименту харчових продуктів. При цьому важливо не тільки забезпечити широкий асортимент товарів, але і підвищити харчову цінність, функціональність і органолептичні показники харчових продуктів.

Вченими нашого університету запропоновано вдосконалити технологію приготування цукрових сиропів, необхідних для виробництва безалкогольних напоїв. Відомо, що приготування цукрових сиропів відбувається шляхом розчинення цукру водою в певних пропорціях, необхідних для створення визначеного за солодкістю напою. Вдосконалити стадію приготування сиропів пропонується шляхом розчинення цукру настоем, який готується на рослинній основі. Застосування настоянок під час приготування сиропів дозволить отримати напій, який вже буде містити смако-ароматичні властивості без внесення додаткових ароматизаторів у продукт.

Вирішити поставлену задачу вдається завдяки використанню настоянок, яким будуть властиві високі органолептичні показники, при цьому сировина, необхідна для їхнього приготування, повинна не бути антагоністичною. Для створення таких настоянок в якості сировини було вирішено обрати плоди кизилу так, як ця сировина задовольняє вимоги, які ставляють для створення настоянки.

Кизил — це чагарник або деревце невеликого розміру, до 7 м у висоту. Він виростає в Молдавії, Криму, на Кавказі та інших теплих регіонах. Плоди є невеликими, мають довгасту форму, можна зустріти грушоподібні і кулясті ягоди. Зовні ягода покривається гладкою шкірочкою, відтінки можуть бути різні і темно-червоний, чорний, темно-фіолетовий, світло-червоний, під нею розміщується смачна, солодка, соковита м'якоть і кісточка. Важить одна ягода до 6 г, до 90 % містить м'якоть.

У плодах кизилу містяться цукри (в основному фруктоза і глюкоза, іноді до 17 %), органічні кислоти (яблучна, винна), дубильні речовини, флавоноїди, антоціани, катехіни, каротиноїди, пектинові речовини.

Кизил багатий такими вітамінами і мінералами, як: вітаміном С - 27,8 %, калієм - 14,5 %, залізом - 22,8 %. Вітамін С бере участь в окисно-відновних реакціях, функціонуванні імунної системи, сприяє засвоєнню заліза.

Метою наукової роботи є дослідження процесу настоювання визначеної сировини, знаходження оптимальних значень факторів, що найбільше впливають на проходження процесу, виведення математично-статистичної моделі, отримання високоякісних настоїв, що будуть володіти необхідними параметрами, для створення безалкогольних напоїв. Виходячи із вищезгаданої інформації, щодо хімічного складу сировини, можна передбачати, що настої з обраної сировини будуть мати ще й функціональне значення. Тому є цікавим визначити вміст біологічно активних речовин в настоях та дослідити їх процес добування з сировини.

Літературний огляд дав можливість визначити фактори, які найсуттєвіше впливають на проходження процесу настоювання. Було обрано три вагомих фактори, вплив яких ми в змозі контролювати: температура середовища, °С; гідромодуль; тривалість процесу, хв. Для дослідження та знаходження оптимальних режимів процесу користувалися методами планування експериментів, які передбачають побудову матриці експериментів та визначення рівнів варіювання факторів. Щоб отримати більш достовірні результати досліджень, варто проводити експерименти з плануванням

другого порядку. Для цього необхідно вказувати три рівні варіювання факторів: нижній; середній (нульовий); верхній.

Для кожної сировини були обрані однакові фіксовані впливові фактори. За нижній рівень температури взяли кімнатну температуру (20 °C), за верхній рівень 60 °C. Обґрунтування вибору верхнього рівня цього фактору стає в наявності термолабільних біологічно активних речовин, вплив високої температури на які сприяє їхньому розпаду. Верхнім рівнем варіювання фактору гідромодуля була така кількість екстрагенту, в якій ми змогли фіксувати зміну концентрації масової частки сухих речовин. Нижнім рівнем було прийнято кількість екстрагенту, що зміг повністю покрити об'єм сировини, за для забезпечення повного проходження процесу настоювання. При визначенні рівнів варіювання фактору експозиції процесу, був прийнятий найменший час, за яким починає повноцінно проходити вилучення компонентів, що складає 30 хвилин. Найбільшу тривалість проведення настоювання обрано за результатами попередніх досліджень, а саме, 180 хвилин.

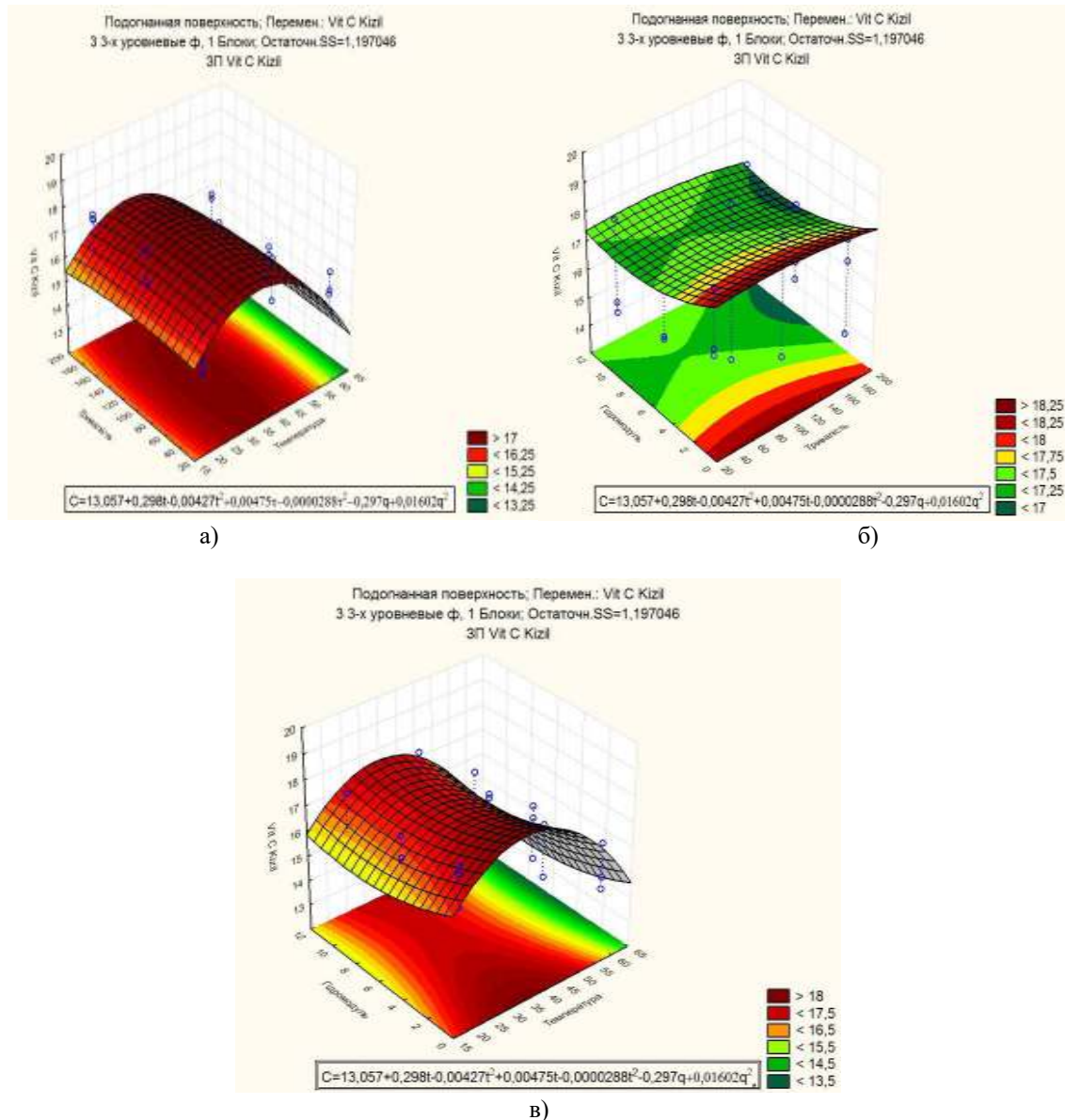


Рис. – Поверхні відгуку вмісту вітаміна С в екстракті кизилу в залежності від тривалості та температури (а), тривалості та гідромодуля (б), гідромодуля та температури (в) процесу екстрагування

Для експериментів були використані плоди кизилу сушені. Сировина до настоювання підготовлювалася, тобто підлягала подрібненню: плоди різалися смужками з виділенням кісточки. Подрібнення матеріалу дозволяє збільшити сумарну площу контакту фаз, що позитивно впливає на перебіг масообмінних процесів. Настоювання проводили в скляних колбах з наважкою сировини в 5 грам. Щоб забезпечувати постійну температуру середовища скляний посуд розміщувався у водяній бані, температуру якої безперервно контролювали шляхом додавання гарячої чи холодної води. Продукт, що отримувався по завершенню настоювання, підлягав фільтруванню через паперовий фільтр. Вже у фільтраті визначався вміст сухих речовин та відбиралася аліквотна частина для визначення вмісту аскорбінової кислоти у розчині. Масова частка сухих речовин визначалася рефрактометричним методом, а вміст вітаміну С – йодометричним методом.

Провівши запланований повний дворівневий трьох факторний експеримент для кожної сировини, ми змогли отримати результати, які висвітлені на наступних графіках.

Ці поверхні відгуку дають змогу візуально виявляти залежності вилучення масових часток сухих речовин та аскорбінової кислоти від різних впливових факторів процесу. Дані графіки побудовані за допомогою програмного забезпечення Statistica 10, що додатково дає можливість вивести математичну модель процесу, рівняння яких представлені на графіках.

Висновки.

Дослідивши процес настоювання, нам вдалось отримати результати експериментів, які були оброблені за допомогою математико-статистичних методів. При цьому визначили оптимальні режими настоювання, які можуть бути рекомендовані для застосування на виробництвах настоїв. Результати вказують, що оптимальними режимами настоювання з метою вилучення найбільшої кількості вітаміну С є наступні: температура 33° С, гідромодуль 8, тривалість 82 хв. Результати дослідницької роботи можуть бути використані для виробництва настоїв на рослинній основі, впровадження удосконаленої технології приготування цукрових сиропів на виробництвах безалкогольних напоїв за для розширення асортименту та надання функціонального значення продуктам.

Література.

1. Разработка технологических режимов приготовления экстрактов (настоев) пряно-ароматических растений / Ершова Т.С., Ткаченко М.Г., Удод Е.Л., Моравек Т.И. // Магарач. Виноградарство и виноделие. - 2001. - № 3. – С. 22.
2. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость. – М.: Химия, 1974. – 256 с..
3. Домарецький В. А. Технологія екстрактів, концентратів та напоїв із рослинної сировини: підручник / Домарецький В. А., Прибильський В. Л., Михайлов М. Г. – Вінниця: Нова Книга, 2005. – 408 с.
4. Ботиров, Э. Х. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы / Э. Х. Ботиров, М. Н. Лютикова // Химия растительного сырья. – 2015. – № 2. – С. 58 – 74.

УДК 663.243

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСТОЮВАННЯ ПЛОДІВ ЖУРАВЛИНИ

БАРАЛОВСЬКА О.В., ПРИЩЕПА Ю.Ю. ЧОРНИЙ В.М., студенти,
МИСЮРА Т.Г., ПОПОВА Н.В. канд. техн. наук, доценти
Національний університет харчових технологій, м. Київ

INVESTIGATION OF CRANBERRY FRUIT INFUSION
BARALOVSKA O., PRYSHCHERA Y., CHORNYI V., students, MISYURA T.,
POPOVA N. Ph.D. docents
National University of Food Technologies, Kyiv

Анотація: Метою дослідницької роботи передбачено дослідження процесу вилучення цільових компонентів під час настоювання рослинної сировини із передбаченням подрібнення матеріалу перед його переробкою. Відомо, що подрібнення застосовують для інтенсифікації процесів масоперенесення за рахунок збільшення сумарної поверхні фази. Запропоновано використання отриманих настоїв в технології безалкогольних напоїв при приготуванні цукрових сиропів. Визначено доцільність використання настоїв з сировини, яка має привабливі органолептичні показники та в змозі надати продукту функціонального значення. Для проведення експериментів взято свіжі поди журавлини, як сировина, що здатна задовольнити потреби якості настою. В якості екстрагенту обрано воду з погляду на її подальше використання в приготуванні сиропу. Прийнято найвпливовіші фактори, якими передбачається управляти процесом. Рівні варіювання цих факторів обрано з розрахунку на попередній огляд літератури. Настоювання проводилось в колбах на водяній бані, яка дозволяла управляти температурою середовища. Показник, який визначав кількісну характеристику проходження процесу була масова частка сухих речовин в настої, що визначався рефрактометричним методом. Показник, який відображав якісну характеристику готових настоїв була масова частка аскорбінової кислоти, що визначалася йодометричним методом. Отримано результати експериментів, на основі яких побудовані поверхні відгуку та розроблено математичні моделі процесу. Визначено, що вилучення водорозчинних сполук із плодів журавлини має різну величину та якісний склад, а саме вміст вітаміну С. На основі результатів математично-статистичної обробки знайдено оптимальні режими настоювання.

Abstract: The purpose of the research envisaged research process extracting target components during infusion of plant material using predictive grinding material before processing. It is known that grinding is used for intensification of mass transfer due to increasing the total surface of phase. The use of infusion derived technology in the preparation of soft drinks in the preparation of sugar syrups. Determined the feasibility of using infusion of raw materials has attractive organoleptic parameters and able to give the product functional significance. For experiments taken fresh cranberries as raw materials that able to meet the needs of quality infusion. As extractant selected water in view of its continued use in the preparation of syrup. It is the most influential factors that are supposed to manage the process. Varying levels of these factors is selected based on a preliminary review of the literature. Infusion conducted in flasks in a water bath, which allows to control the temperature of the environment. An index that determines a quantitative description of the passage of the process is the mass fraction of solids in the infusion which was determined by refractometric method. An index that reflects the qualitative characteristics of infusions was the mass fraction of ascorbic acid was determined by iodometric method. The results of experiments based on which constructed surface response and mathematical models of the process. Determined that the removal of soluble compounds from cranberry fruit has a different value and qualitative composition, such as vitamin C.. On the basis of mathematical-statistical analysis found optimal modes of infusion.

Ключові слова: настоювання, журавлина, цукровий сироп.

Keywords: extraction, infusion, cranberries, sugar syrup.

В даний час особливу актуальність набуває проблема вдосконалення технологій і розширення асортименту харчових продуктів. При цьому важливо не тільки забезпечити широкий асортимент товарів, але і підвищити харчову цінність, функціональність і органолептичні показники харчових продуктів.

Вченими нашого університету запропоновано вдосконалити технологію приготування цукрових сиропів необхідних для виробництва безалкогольних напоїв. Відомо, що приготування цукрових сиропів відбувається шляхом розчинення цукру водою в певних пропорціях, необхідних для створення визначеного за солодкістю напою. Вдосконалити стадію приготування сиропів пропонується шляхом розчинення цукру настоем, який готується на рослинній основі. Застосування настоянок під час приготування сиропів дозволить отримати напій, який вже буде містити смако-ароматичні властивості без внесення додаткових ароматизаторів у продукт.

Вирішити поставлену задачу вдається завдяки використанню настоянок, яким будуть властиві високі органолептичні показники, при цьому сировина, необхідна для їхнього приготування, повинна не бути антагоністичною. Для створення таких настоянок в якості сировини було вирішено обрати плоди журавлини так, як ця сировина задовольняє вимоги, які ставляють для створення настоянки.

Журавлина – це цінний харчовий і лікувальний продукт. У ягодах журавлини знаходиться від 4 до 5 % цукрів: в основному глюкоза і фруктоза. З органічних кислот зустрічаються яблучна, лимонна і бензойна. Бензойна кислота є консервантом і дозволяє зберігати ягоди без переробки. В ягодах журавлини багато макро- та мікроелементів, є пектинові і дубильні речовини. Плоди журавлини багаті вітамінами (С,РР), наприклад вміст вітаміну С становить 13,3 мг/100 г. Окремо у складі журавлини можна виділити флавоноїди — антоціани, лейкоантоціани, катехіни.

Метою наукової роботи є дослідження процесу настоювання визначеної сировини, знаходження оптимальних значень факторів, що найбільше впливають на проходження процесу, виведення математично-статистичної моделі, отримання високоякісних настоїв, що будуть володіти необхідними параметрами, для створення безалкогольних напоїв. Виходячи із вищезгаданої інформації, щодо хімічного складу сировини, можна передбачати, що настої з обраної сировини будуть мати ще й функціональне значення. Тому є цікавим визначити вміст біологічно активних речовин в настоях та дослідити їх процес добування з сировини.

Літературний огляд дав можливість визначити фактори, які найсуттєвіше впливають на проходження процесу настоювання. Було обрано три вагомих фактори, вплив яких ми в змозі контролювати: температура середовища, °С; гідромодуль; тривалість процесу, хв. Для дослідження та знаходження оптимальних режимів процесу користувалися методами планування експериментів, які передбачають побудову матриці експериментів та визначення рівнів варіювання факторів. Щоб отримати більш достовірні результати досліджень, варто проводити експерименти з плануванням другого порядку. Для цього необхідно вказувати три рівні варіювання факторів: нижній; середній (нульовий); верхній.

Для кожної сировини були обрані однакові фіксовані впливові фактори. За нижній рівень температури взяли кімнатну температуру (20 °С), за верхній рівень 60 °С. Обґрунтування вибору верхнього рівня цього фактору стає в наявності термолабільних біологічно активних речовин, вплив високої температури на які сприяє їхньому розпаду. Верхнім рівнем варіювання фактору гідромодуля була така кількість екстрагенту, в якій ми змогли фіксувати зміну концентрації масової частки сухих речовин. Нижнім рівнем було прийнято кількість екстрагенту, що зміг повністю покрити об'єм сировини, за для забезпечення повного проходження процесу настоювання. При визначенні рівнів варіювання фактору експозиції процесу, був прийнятий найменший час, за яким починає повноцінно проходити вилучення компонентів, що складає 30 хвилин. Найбільшу тривалість проведення настоювання обрано за результатами попередніх досліджень, а саме, 180 хвилин.

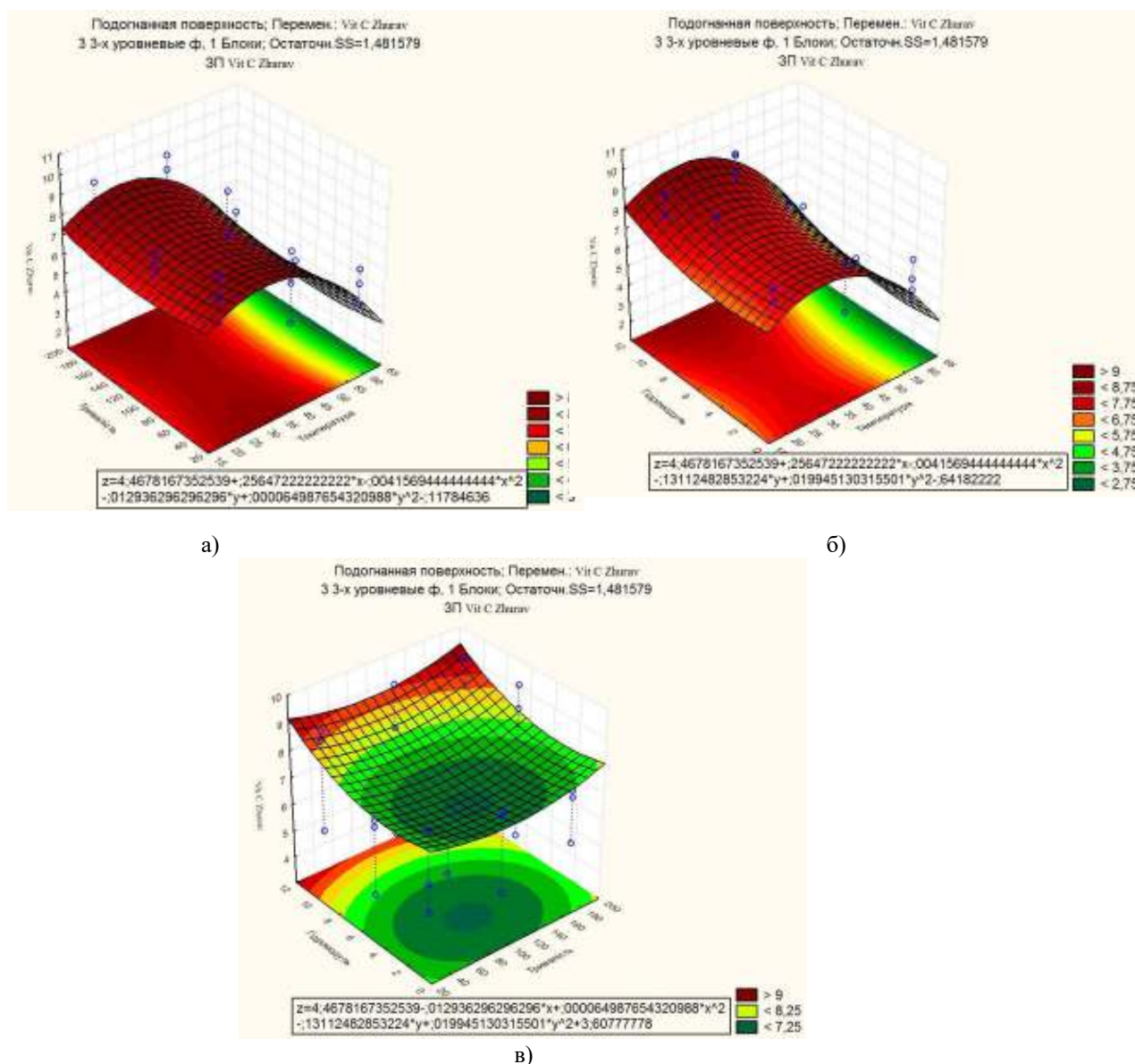


Рис. Поверхні відгуку вмісту вітаміна С в екстракті журавлини в залежності від тривалості та температури (а), тривалості та гідромодуля (б), гідромодуля та температури (в) процесу екстрагування

Для експериментів були використані плоди журавлини свіжі, які відповідають вимогам затвердженого ДСТУ на них. Сировина до настоювання підлягала подрібненню. Свіжі плоди журавлини чавилися. Подрібнення матеріалу дозволяє збільшити сумарну площу контакту фаз, що позитивно впливає на перебіг масообмінних процесів. Настоявання проводили в скляних колбах з наважкою сировини в 5 грам. Щоб забезпечувати постійну температуру середовища скляний посуд розміщувався у водній бані, температуру якої безперервно контролювали шляхом додавання гарячої чи холодної води. Продукт, що отримувався по завершенню настоювання, підлягав фільтруванню через паперовий фільтр. Вже у фільтраті визначався вміст сухих речовин та відбиралася аліквотна частина для визначення вмісту аскорбінової кислоти у розчині. Масова частка сухих речовин визначалася рефрактометричним методом, а вміст вітаміну С – йодометричним методом.

Провівши запланований повний дворівневий трьох факторний експеримент для кожної сировини, ми змогли отримати результати, які висвітлені на наступних графіках.

Ці поверхні відгуку дають змогу візуально виявляти залежності вилучення масових часток сухих речовин та аскорбінової кислоти від різних впливових факторів процесу. Дані графіки побудовані за допомогою програмного забезпечення Statistica 10, що додатково дає можливість вивести математичну модель процесу, рівняння яких представлені на рисунках.

Висновки.

Дослідивши процес настоювання, нам вдалось отримати результати експериментів, які були оброблені за допомогою математико-статистичних методів. Визначили оптимальні режими настоювання, які можуть бути рекомендовані для застосування на виробництвах настоїв. Результати вказують, що оптимальними режимами настоювання з метою вилучення найбільшої кількості вітаміну С є наступні: температура 33° С, гідромодуль 2,5, тривалість 76 хв. Результати дослідницької роботи можуть бути використані для виробництва настоїв на рослинній основі, впровадження удосконаленої технології приготування цукрових сиропів на виробництвах безалкогольних напоїв за для розширення асортименту та надання функціонального значення продуктам.

Література.

1. Разработка технологических режимов приготовления экстрактов (настоев) пряно-ароматических растений / Ершова Т.С., Ткаченко М.Г., Удод Е.Л., Моравек Т.И. // Магарач. Виноградарство и виноделие. - 2001. - № 3. - С. 22.
2. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость. – М.: Химия, 1974. – 256 с.
3. Лекарственное растительное сырье и фитосредства :учеб. пособие / П. И. Среда, Н. П. Максютин, Е. Н. Токаменская и др.; под ред. проф. П. И. Середы. – М. : ВСИ «Медицина», 2010. – 272 с.
4. Ботиров, Э. Х. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы / Э. Х. Ботиров, М. Н. Лютикова // Химия растительного сырья. – 2015. – № 2. – С. 58 – 74.

УДК 66.047.55

**КІНЕТИКА СУШІННЯ СОЇ ТА СОНЯШНИКУ СИРОВИНИ
В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ**

**Бандура В.М., к.т.н., професор
Вінницький національний аграрний університет
Маренченко О. І., Пилипенко Є. О., Катасонов О. В.
Одеська національна академія харчових технологій**

**KINETICS OF SUNFLOWER SEEDS AND SOYBEANS
DRYING IN ELECTROMAGNETIC FIELD**

**Bandura V.M., Ph.D., Professor
Vinnitsa National Agrarian University
Marenchenko O.I., Pilipenko Ye.O., Katasonov O.V.
Odessa National Academy of Food Technologies**

Abstract: It is shown that Ukraine is the leader among the countries producing sunflower oil and the volume of its processing is growing dynamically. There is also demand for soybean oil. The key process in oil production technologies is the drying of raw materials. It is drying that largely determines the energy consumption of oilseeds and the quality of the product. In the conditions of the energy crisis, reduction of specific energy consumption in food technologies is a priority task. The expediency of finding the newest approaches to the organization of the process of drying oilseeds, the definition of conditions that will provide the necessary regime parameters with minimum specific energy costs is substantiated. The paper proposes an innovative method of drying soybeans and sunflower seeds using electromagnetic energy generators of microwave and infrared ranges, and air has the role of a diffusion medium. It has been shown

that this method can significantly increase the energy efficiency of the drying process and reduce the duration of the process of removal of moisture. It is shown that the intensification of the drying process with the combined microwave and infra-red energy is achieved through the successive action of the emitters. The microwave field facilitates the movement of moisture from the inner layers of the seed to the surface, and the infrared field is already removing moisture from the surface.

The scheme of the experimental installation and the formed tasks of experimental research are presented. The experiments used a tape drier, which has three cascades of microwave and infrared emitters. The methodology, which allowed to correctly determine the influence of regime parameters on the process of drying soybeans and sunflower seeds, is given. The influence of the type of the energy supplied, the specific power, the load on the tape, the type of product on the kinetics of drying has been determined. The drying lines, the drying rate line at various ratios of the emitter capacities and loads on the soybean and sunflower seeds straw are presented. Analysis of results is given. A comparison of different drying modes is feasible and reasonably feasible, which allows designing belt dryers with electromagnetic energy sources for soybeans and sunflower seeds.

Key words: electromagnetic energy sources, sunflower drying and soybeans, energy efficiency.

Анотація: Показано, що Україна є лідером серед країн – виробників соняшникової олії і обсяги її переробки динамічно зростають. Поширюється попит і на олію із сої. Ключовим процесом в технологіях олійного виробництва є сушіння сировини. Саме сушіння в значній мірі визначає витрати енергії олійних технологій та якість продукту. В умовах енергетичної кризи скорочення витрат питомих енергій в харчових технологіях є першочерговим завданням. Обґрунтована доцільність пошуку новітніх підходів до організації процесу сушіння олійної сировини, визначення умов, які забезпечать необхідні режимні параметри при мінімальних питомих витратах енергії. В роботі пропонується інноваційний метод сушіння сої та насіння соняшника за допомогою електромагнітних генераторів енергії мікрохвильового та інфрачервоного діапазонів, а повітря має роль дифузійного середовища. Показано, що такий метод дозволяє значно підвищити енергетичну ефективність процесу сушіння та скоротити тривалість процесу видалення вологи. Наведено, що інтенсифікація процесу сушіння при комбінованому мікрохвильовому та інфрачервоному підведенні енергії досягається за рахунок послідовної дії випромінювачів. Мікрохвильове поле сприяє руху вологи із внутрішніх шарів насіння до поверхні, а інфрачервоне поле вже відводить вологу з поверхні.

Представлено схему експериментальної установки та сформовані завдання експериментальних досліджень. В досліді використано стрічкову сушарку, що має три каскади мікрохвильових та інфрачервоних випромінювачів. Наведено методику, яка дозволила коректно визначити вплив режимних параметрів на процес сушіння сої та насіння соняшнику. Визначено вплив виду підведеної енергії, питомої потужності, навантаження на стрічку, виду продукту на кінетику сушіння. Представлено лінії сушіння, лінії швидкості сушіння при різних співвідношеннях потужностей випромінювачів та навантажень на стрічку для сої та насіння соняшника. Дано аналіз результатів. Проведено порівняння різних режимів сушіння та обґрунтовано доцільні, що дозволяє проектувати стрічкові сушарки з електромагнітними джерелами енергії для сої та насіння соняшника.

Ключові слова: електромагнітні джерела енергії, сушіння соняшнику та сої, енергоефективність.

Вступ. Енергетика є основою усього світового господарства. Приблизно чверть усіх споживаних енергоресурсів витрачається у електроенергетиці. Інші три чверті – це промислове і побутове тепло, транспорт, металургійні і хімічні та харчові процеси. Підприємства харчової галузі вважаються лідерами по об'єму споживанню енергетичних ресурсів. Серед харчових технологій потужним споживачем енергетичних ресурсів є олійно-жирові підприємства. Останні роки характеризуються динамічним підвищенням продуктивності цих виробництв, бо попит на рослинні олії в світі постійно зростає. Це призводить до збільшення посівів рослин з великим вмістом олій. На виробництво харчових олій на долю соняшника випадає 77% усього світового виробництва, Україна ж виробляє 54% соняшникової олії. Темпи виробництва зростають щорічно. Провідне місце на ринку харчових олій займає і соєва олія. Із використанням соєвої олії виробляють величезну кількість харчових продуктів, включаючи салати, маргарин, хліб, майонез, немолочні вершки для кави та ін. Крім того, в сої великий вміст лецитину, який відокремлюють з насіння сої разом із олією для використання в кондитерській та фармацевтичній промисловості [1].

Важливою є задача тривалого зберігання олійної сировини. Насіння соняшнику та сої зберігається при вологості 6-7% та 8-9% відповідно, та температурі 10-15 °С [2]. Для надійності зберігання, а також для організації ефективного вилучення олії із сировини, невід'ємною, а також найважливішою, складовою є процес сушіння.

Актуальність. Насіння олійних культур завдяки щільній оболонці витримує високі температури при нагріванні. Використовують для його сушіння шахтні сушарки, застосовуючи приблизно такі самі режими, як і для зернових. Насіння з високою вологістю сушать за кілька пропусків з проміжним (6-7 год) відлежуванням, під час якого підсохла оболонка поглинає вологу ядра, а при черговому пропуску легко видаляється (у насіння соняшнику, оскільки високі температури призводять до розтріскування оболонок)

Кращою для сушіння насіння соняшнику є швидка подача повітря з високою температурою, ніж тривала з низькою [3]. При зменшенні часу та температури сушіння підвищиться продуктивність та обсяг виготовленої продукції, крім того – збільшиться енергоефективність використання сушильної техніки.

Аналіз літературних джерел. Температура сушіння на порційних зерносушарках повинна становити 60°C. Температура сушіння на поточних зерносушарках може досягати 65°C. При сушінні зерна соняшника призначеного для посіву температура сушіння не повинна перевищувати 43°C [4, 5].

В останні роки росте цікавість до технологій зневоднення в електромагнітному полі. Одним із способів такої технології є сушка в мікрохвильовому полі. Тривалість процесу сушіння з підводом мікрохвильової енергії на 40...90 % менше тривалості сушіння традиційними способами [4, 5]. Встановлено, що обробка продуктів в МХ-полі суттєво знижує їх мікробіологічне забруднення [6]. В той ж час виділяють ряд обмежень мікрохвильового сушіння: нерівномірність електромагнітного поля усередині мікрохвильової камери, що приводить до нерівномірності нагріву продукту, обмежена глибина проникнення мікрохвильового поля в продукт, дуже висока швидкість масоперенесення, яка може визвати небажані зміни в структурі продукту [6].

Метод ІЧ-опромінювання є одним із перспективних фізичних методів обробки харчових продуктів. За умови застосування ІЧ-випромінювання значно скорочується тривалість термічної обробки, що обумовлено відсутністю термічного опору пограничного шару продукту променистому потоку, енергія якого безпосередньо поглинається поверхнею частинок сировини. При цьому ІЧ-випромінювання активно поглинається водою, яка міститься у продукті, але не поглинається тканиною продукту котрий висушується або термообробляється. Тому видалення вологи можливе за невисоких температур (4...60°C), що дає можливість максимально зберігати вітаміни, біологічно активні речовини, природний (натуральний) колір, смак і аромат продуктів, які підлягають сушінню або термічній обробці [1].

Мета досліджень. За ціль було поставлено оцінити ефективність процесу сушіння в стрічковій сушарці з використанням електромагнітних джерел енергії. Визначити вплив потужності НВЧ та ІЧ випромінювання, виду продукту та завантаження стрічки на інтенсивність сушіння. Зробити порівняльний аналіз і визначити кращі режими процесу сушіння. **Об'єкт сушіння** – насіння соняшника та сої.

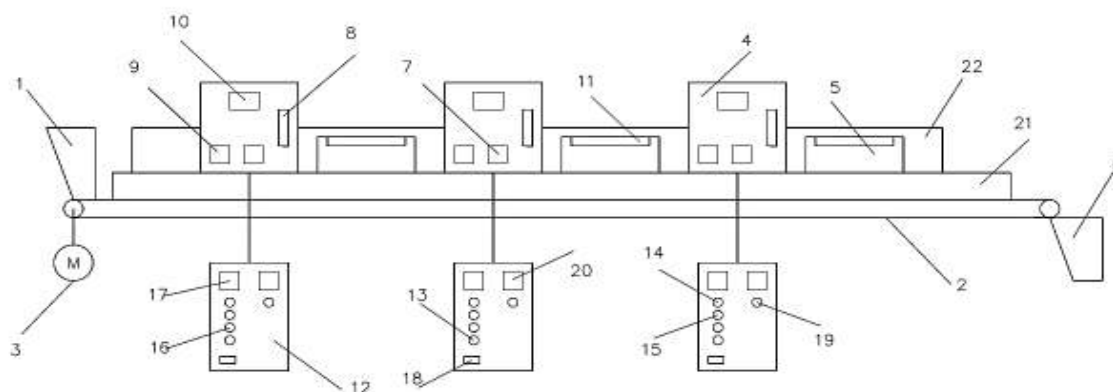


Рис.1. Схема НВЧ і ІЧ експериментальної сушарки.

Результати експериментальних досліджень сушіння насіння соняшника й сої та їх обговорення.

НВЧ і ІЧ сушарка (рис.1) складається із бункера завантаження - 1, через який сирій продукт надходить на стрічковий конвеєр - 2, що приводиться в рух приводом - 3. Далі продукт просувається до модуля НВЧ - 4 і модуля ІЧ - 5. На технологічній лінії розміщено по три таких модуля. Далі висушений продукт вивантажується в бункер - 6. НВЧ модуль складається з магнетрона - 7, вентилятора - 8, високовольтного трансформатора - 9 і витяжний вентилятор - 10. ІЧ модуль складається з ІЧ випромінювача - 11. За допомогою панелі керування - 12 відбувається настройка потужності НВЧ випромінювання - 13. Час роботи НВЧ модуля встановлюється за допомогою кнопок - 14, 15, 16. Дані налаштувань потужності і часу виводяться на аналоговий датчик - 17, модуль приводиться в дію кнопкою «пуск / стоп» - 18. На механічному датчику - 19 відображається потужність ІЧ випромінювання регульована за допомогою перемикача потужності - 20. Корпус установки - 21 покритий ізоляцією - 22.

Дослідження інноваційного методу сушіння проведено в широкому діапазоні експериментальних даних (табл. 1).

Таблиця 1. Діапазон експериментальних досліджень.

Вид сировини	Питома потужність НВЧ випромінювання $N_{\text{нвч}}, \text{кВт/м}^2$	Питома потужність ІЧ випромінювання $N_{\text{іч}}, \text{кВт/м}^2$	Завантаження стрічки $g, \text{кг/м}^2$	Тривалість процесу сушіння $\tau, \text{хв}$	Температура сушіння $T, ^\circ\text{C}$
Соняшник	7,5...15	7,33...11	3,96...7,92	30...45	34...39
Соя	7,5...15	7,33...11	4,8...9,6	40...70	35...41

На стрічці розміщувалось 8 касет із насінням. Маса порожніх касет та зерна визначалась електронними вагами ТВЕ-0.21-0.01. Температури продукту вимірювались дистанційно датчиками типу Dallas DS 18B20. Зміна маси зерна в касеті визначала масу вилученої вологи.

В дослідях фіксувалось тривалість процесу (τ), температура (T) та маса сировини під час обробки. Питома маса матеріалу (g) показує масу (m) продукту на одиницю поверхні обробки (F), а питома потужність електромагнітну енергію, котра витрачається на 1 м^2 оброблюваної поверхні.

Вивчався вплив потужності підведеної енергії на середню швидкість процесу сушіння. Досліди проводились при швидкості руху стрічки транспортера $0,025 \text{ м/с}$, питомого завантаження $3,96 \text{ кг/м}^2$. Кількість видаленої вологи визначали по початковій і кінцевій вологості соняшника. Швидкість сушіння розраховувалась за зміною відсотку вологості за одиницю часу (1), на протязі якого на соняшник впливало електромагнітне випромінювання (рис.2-3).

$$\omega = \frac{M_{\text{в}}^{\text{п}} - M_{\text{в}}^{\text{к}}}{M_{\text{пр}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де, ω – відсоток поточного стану вологи, $M_{\text{в}}^{\text{п}}$ – маса вологи початкова, $M_{\text{в}}^{\text{к}}$ – маса вологи кінцева,

$M_{\text{пр}}$ – маса продукту.

Зважування проводились з інтервалом у $7,5$ хвилин, після чого за формулою (1) розраховувався поточний стан вологості продукту.

При сушінні соняшника (рис. 2), тип підведеної енергії значно впливає на процес сушіння, підведення потужності у 11 кВт/м^2 при ІЧ-випромінюванні у $2,5$ рази швидше видаляє вологу ніж при використанні НВЧ-випромінювання з потужністю у $11,25 \text{ кВт/м}^2$. Крім того, при тій самій потужності ІЧ-випромінювання висушує у $1,7$ рази швидше ніж при потужності зменшеній у $1,5$ рази.

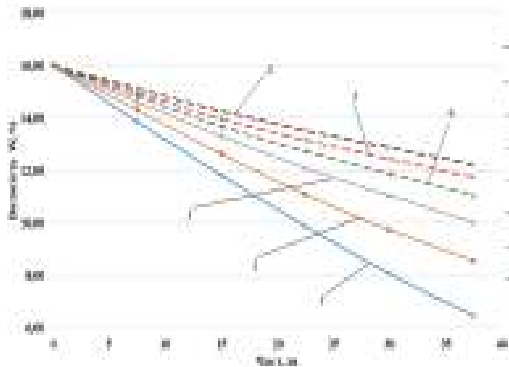


Рис. 2. Вплив питомої потужності та типу підведеної енергії на кінетику сушіння соняшника.

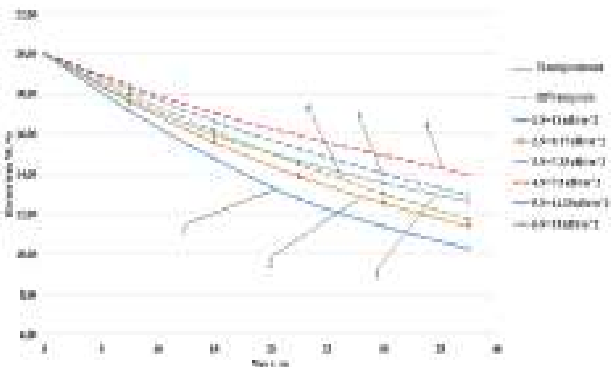


Рис. 3. Вплив типу підведеної енергії та питомої потужності на кінетику сушіння сої.

При сушінні сої (рис. 3), тип підведеної енергії майже не впливає на процес сушіння, підведення потужності у 11 кВт/м² при ІЧ-випромінненні у 1,5 рази швидше видаляє вологу ніж при використанні НВЧ-випроміннення з потужністю у 11.25 кВт/м². Крім того, при тій самій потужності ІЧ-випроміннення висушує у 1.2 рази швидше ніж при потужності зменшеній у 1.5 рази.

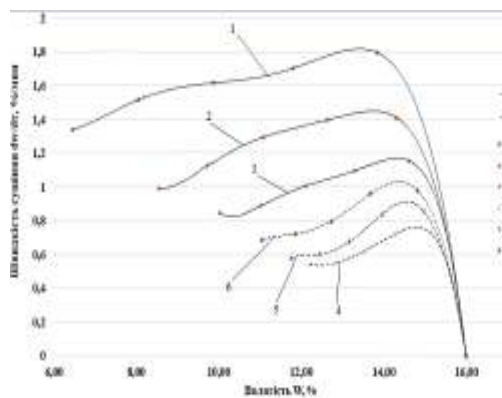


Рис. 4. Вплив типу підведеної енергії та питомої потужності на швидкість сушіння соняшника.

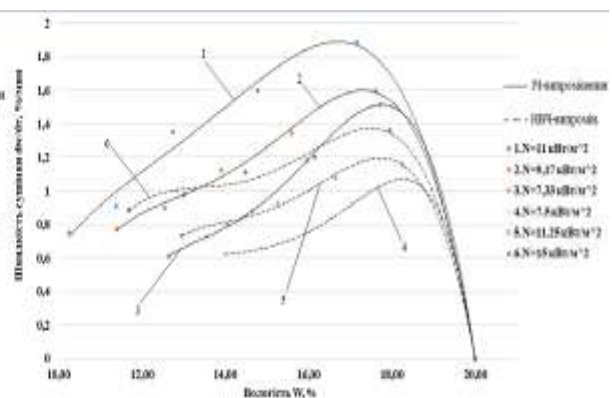


Рис. 5. Вплив типу енергії та питомої потужності на швидкість сушіння сої.

Тип підведеної енергії при сушіння соняшника (рис. 4) значною мірою вплинув на швидкість сушіння. При підводі ІЧ-випроміннення швидкість сушіння у 1.8 рази більша ніж при використанні НВЧ-випроміннення, і становить 1.35...1.8 %/хв та 0.68...1%/хв відповідно. Також, при зменшенні потужності підведеної енергії при ІЧ-випромінненні у 1.5 рази, швидкість сушіння зменшиться у 1.3. рази і становитиме 0.83...1.18 %/хв.

При сушінні сої тип підведеної енергії (рис. 5) має незначний вплив на швидкість сушіння. При підводі ІЧ-випроміннення швидкість сушіння у 1.2 рази більша на початку процесу сушіння ніж при використанні НВЧ-випроміннення, і становить 1.88 %/хв та 1.38 %/хв відповідно, а в кінці процесу швидкість сушіння майже однакова – 0.76 %/хв та 0.88 %/хв відповідно. Також, при зменшенні потужності підведеної енергії при ІЧ-випромінненні у 1.5 рази, швидкість сушіння зменшиться у 1.2. рази і становитиме 0.6...1.52 %/хв.

При збільшенні кількості модулів (рис. 6) спостерігаються незначні зміни у швидкості сушіння сої із застосуванням НВЧ-генератора енергії 0.7...1.7 %/хв, і досить суттєві зміни швидкості сушіння відбуваються із застосуванням ІЧ-випромінювачів, при підключенні другого модулю швидкість сушіння зростає у 1.7 рази 1.7...2.95 %/хв, підключення третього модулю дає результат у 2 рази кращий ніж при застосуванні одного модуля швидкість сушіння зростає із 1.1...1.7 %/хв до 1.4...3.45%/хв.

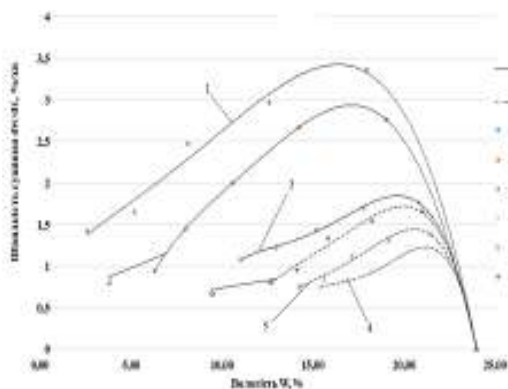


Рис. 6. Вплив типу підведеної енергії та кількості джерел енергії на швидкість сушіння сої.

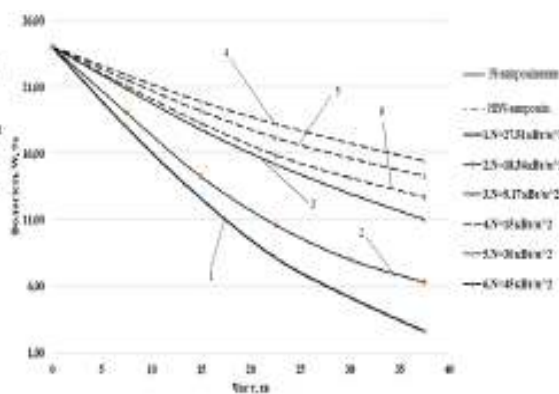


Рис. 7. Вплив типу підведеної енергії та кількості джерел енергії на лінію сушіння сої.

На лінії сушіння (рис. 7) чітко спостерігається вплив типу підведеної енергії та питомої потужності на процес зневоднення. Використання трьох ПЧ-випромінювачів у двічі швидше висушує сою до необхідного рівня вологості 9% і час сушіння триває при трьох модулях 20 хвилин, а при одному модулі – близько 40 хвилин. НВЧ-генератори енергії при різній кількості модулів сприяють видаленню вологи майже однаково і для висушування сої до 9% знадобиться близько 60-70 хвилин, що у тричі більше ніж крапці показники при використанні ПЧ-генераторів енергії.

Вплив використання типу підведеної енергії та кількості модулів на швидкість сушіння соняшника (рис. 8) досить суттєвий. ПЧ-випромінювач енергії при збільшенні їх кількості значною мірою вплинули на швидкість сушіння при одному модулі швидкість сушіння 1.2...1.51 %/хв, а використання трьох модулів покращує результат у 2 рази і швидкість сушіння зростає – 1.3...3.2 %/хв. Збільшення модулів НВЧ-генераторів енергії вплинуло на швидкість сушіння у 1.3 рази, швидкість при використанні одного модуля коливалася в межах 0.6...1.95 %/хв, а при трьох модулях – 0.65...2.7 %/хв.

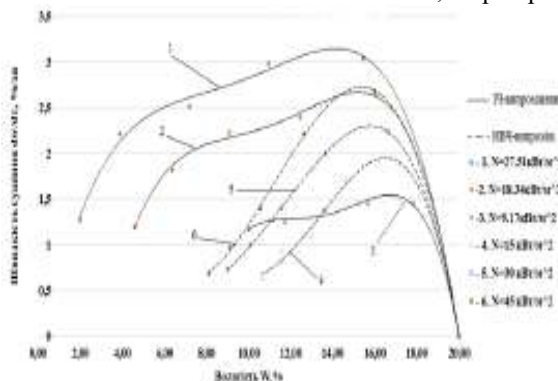


Рис. 8. Вплив типу підведеної енергії та кількості джерел енергії на швидкість сушіння соняшника.

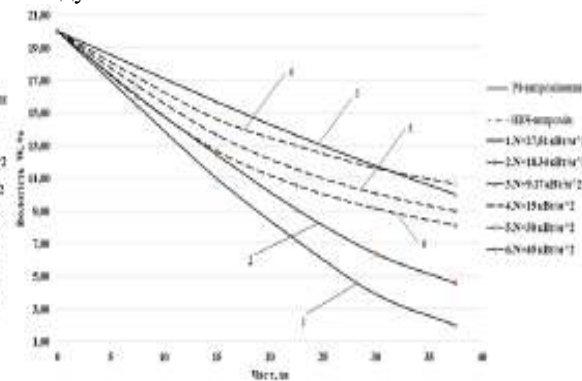


Рис. 9. Вплив типу підведеної енергії та кількості джерел енергії на лінію сушіння соняшника.

Крім того, вплив на лінію сушіння соняшника (рис.9) типу підведеної енергії досить великий.

НВЧ-генератори енергії дали кращий результат лише порівняно з використанням одного модуля з ПЧ-випромінювачем енергії. Проте, чітко видно, що при використанні трьох модулів із ПЧ-випромінювачем енергії сушити до 6% за 25 хвилин, у той час коли трьома модулями із НВЧ-генераторами енергії знадобиться близько 60-70 хвилин.

Висновок: В ході експериментальних досліджень впливу НВЧ-генераторів енергії та ПЧ-випромінювачів на процес сушіння насіння соняшнику та сої було отримано лінії швидкості та лінії сушіння, які наведені з порівнянням виду підведеної енергії та впливу питомої потужності на кожний з досліджених продуктів. Крім того було помічено, що насіння соняшнику, при ПЧ-випромінювачах енергії, проходило більш активно ніж при НВЧ-генераторах енергії при будь-якій підведеній потужності, що свідчить про те, що при сушінні насінні соняшнику краще використовувати ПЧ-випромінювачі енергії. На процес сушіння сої, тип підводу енергії суттєвого впливу не оказує, тому, можливо,

використовувати комбінований метод сушіння використовуючи НВЧ-генератори енергії та ІЧ-випромінювачі.

Література:

1. Друкований М.Ф. Удосконалення теплотехнологій при виробництві олії та біодизельного пального. Монографія / М.Ф. Друкований, В.М. Бандура, Л.М. Колянковська, В.І. Паламарчук. – Вінниця, РВВ ВНАУ, 2014. – 254 с.
2. «Зберігання і переробка продукції рослинництва»/ «2.4.5. Особливості сушіння зерна окремих культур»/ <http://buklib.net/books/21971/>
3. «Гідрофільні властивості соняшникового насіння»/ Манк В.В., Ковалевська Є.І., Мельник О.П., Максимова І.М./ Національний університет харчових технологій, Могилів-Подільський технологічний технікум ВДАУ/ Україна 2008р 2-3с.
4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
5. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
6. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. М., 1981. – 200 с.

УДК 621.9.048.6

СУШАРКИ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

Яровий І.І.¹, к.т.н., Катасонов О.В.², аспірант

DRYERS NEXT GENERATION

Yarovy I.I.¹, Ph.D. Katasonov O.V.²

Abstract: The next generation dryers should use in their work not convective but a new, innovative way of supplying heat energy. The most promising is the use of ultrahigh-frequency radiation.

Using as an energy source MW field one can solve one of the main problems of modern convection drying technology. The problem is that heat is transferred to the moisture of the material through several agents - intermediaries. At each of the stages of this sequence there are unproductive losses, and the amount of heat should be brought to the moist material to heat up all material to a temperature at which intense evaporation of moisture will take place. In a detailed analysis, such a drying scheme looks far from optimal.

Drying using the MW field in the convection background looks like an almost perfect alternative. This method of drying allows you to generate heat by acting directly on the moisture contained in the material, without intermediaries, minimally heating the material itself.

The rate of heating and damp removal in the MW drying chamber is much higher than that of a convection heating dryer. Each of the drying chambers provides removal of moisture from the stream of moist material. The drying chambers themselves can be combined in sequential and parallel groups, and the intelligent control of the operation mode of each of the cameras will ensure the implementation of flexible drying scenarios.

Equipment using MW heating can be easily integrated into modern designs of current dryers and other process equipment. Of particular interest is the possibility of creating a drying MW module with a vertical arrangement of working areas.

The study of the dynamics of material heating by the MW field, in the volume of the sample at different distances (depth) relative to the source of radiation was carried out. In most experiments, there was a linear dependence of the temperature of the layer on the radiation power and depth of the layer. Experiments have shown a high dynamics of the heat of the moisture in the material. So with 80% of the magnetron power (0.6 kW) at a depth of about 0.1 m, the temperature increased by 25 grams. With just 250 s. It is such a "fast" heating that provides high performance of MW devices.

Given the ultrahigh, compared with the existing methods, the heating rate, the technology of using the energy of the microwave electromagnetic field to process the flow of plant material will undoubtedly find its place in modern technological processes.

Анотація Сушарки наступного покоління мають використовувати в роботі не конвективний а новий, інноваційний спосіб підводу теплової енергії. Найбільш перспективним виглядає використання надвисокочастотного випромінювання.

Використовуючи в якості енергопідводу МХ поле можна вирішити одну з основних проблем сучасних конвективних сушильних технологій. Проблема в тому, що тепло передається волозі матеріалу через декілька агентів – посередників. На кожному з етапів цієї послідовності є непродуктивні втрати, а до вологого матеріалу слід підвести скільки тепла, щоб нагріти увесь матеріал до температури при якій

буде проходити інтенсивне випарювання вологи. При детальному аналізі, така схема сушіння виглядає далекою від оптимальної.

Сушка з використанням МХ поля на фоні конвективної виглядає майже ідеальною альтернативою. Даний спосіб сушіння дозволяє генерувати тепло впливаючи безпосередньо на вологу, що міститься в матеріалі, без посередників, мінімально нагріваючи сам матеріал.

Швидкість нагрівання та вологовидалення у МХ сушильної камери значно вища, ніж у сушарки з конвективним способом нагрівання. Кожна з сушильних камер забезпечує видалення з потоку вологого матеріалу деякої кількості вологи. Самі сушильні камери можуть комбінуватись у послідовні та паралельні групи, а інтелектуальне керування режимом роботи кожної з камер забезпечить реалізацію знучких сценаріїв сушіння.

Обладнання з використанням МХ нагріву може бути легко інтегроване у сучасні конструкції поточних сушарок та інших технологічних апаратів. Особливо цікавою виглядає можливість створення сушильного МХ-модуля з вертикальною компоновкою робочих зон.

Проведено дослідження динаміки нагріву матеріалу МХ полем, в об'ємі зразка на різних відстанях (глибині) відносно джерела випромінювання. У більшості дослідів спостерігалась лінійна залежність температури шару від потужності випромінювання та глибини залягання шару. Досліди продемонстрували високу динаміку нагріву вологи в матеріалі. Так при 80% потужності магнетрону (0,6 кВт) на глибині близько 0,1 м температура зростала на 25 гр. С всього за 250 с. Саме такий «швидкий» нагрів забезпечує високі показники продуктивності МХ апаратів.

Зважаючи на надвисоку, порівняно з існуючими способами, швидкість нагріву, технологія використання енергії мікрохвильового електромагнітного поля для обробки потоку рослинної сировини безперечно знайде своє місце у сучасних технологічних процесах.

Keywords - drying, vegetable raw material, microwave electromagnetic field, tape drying, innovative way of power transmission.

Ключові слова – сушіння, рослинна сировина, мікрохвильове електромагнітне поле, стрічкова сушарка, інноваційний спосіб енергопідводу.

Сушарки наступного покоління мають використовувати в роботі не конвективний а новий, інноваційний спосіб підводу теплової енергії до оброблюємої сировини для нагрівання та випарювання вологи.

В якості середовища енергопідводу найбільш перспективним виглядає використання направленої потоку надвисокочастотного випромінювання (електромагнітне поле мікрохвильового діапазону). Між тим вплив мікрохвильового (МХ) поля на вологі матеріали є досить специфічним. МХ поле, при достатній його потужності, інтенсивно впливає на молекули води, тобто на вологу, що міститься у матеріалі, змушуючи молекули (які за їх природою є полярними) переорієнтовуватись у просторі відповідно до зміни напруженості поля та полярності електромагнітних хвиль. Чим більшою є потужність та частота МХ поля тим інтенсивніше рухаються молекули води. Внаслідок такого «стремління» молекул, пропорційно його інтенсивності, виділяється тепло, а вже внаслідок виділення вологою тепла нагрівається вологий матеріал. Даний фізичний ефект взаємодії МХ поля з молекулами води називають «молекулярним тертям», ефект відомий досить давно і широко використовується у мікрохвильових побутових печах.

Таким чином використовуючи в якості енергопідводу тільки МХ поле можна вирішити одну з основних проблем сучасних конвективних сушильних технологій. Проблема полягає в тому, що тепло передається волозі матеріалу через декілька агентів – посередників: спочатку тепло генерується спалюванням палива, далі тепло передається сушильному агенту, потім сушильний агент нагріває вологий матеріал і лише внаслідок нагріву матеріалу тепло передається волозі, яка при достатньому енергопідводі видалається випарюванням. На кожному з етапів цієї послідовності передачі тепла є непродуктивні втрати, а в кінці ланцюга перетворень до вологого матеріалу (суха частка якого складає чималий відсоток) слід підвести скільки тепла, щоб нагріти увесь матеріал до такої температури при якій буде проходити інтенсивне випарювання вологи. При детальному аналізі, така схема вологовидалення виглядає далекою від оптимальної.

Сушка з використанням МХ поля на фоні конвективної виглядає майже ідеальною альтернативою, даний спосіб сушіння дозволяє генерувати тепло впливаючи безпосередньо на вологу, що міститься в матеріалі, без посередників, мінімально нагріваючи сам оброблюємий матеріал. Різницю в механізмах взаємодії з матеріалом сушильного агента та електромагнітного МХ поля детально описано та проаналізовано в роботах проф.. О.Г. Бурдо [1] та інших науковців кафедри ПОіЕМ академії [2]. МХ сушіння має багато переваг порівняно з традиційною конвективною сушкою:

- для роботи МХ сушарки використовується лише електроенергія, в роботі відсутні будь які інші впливи на об'єкт сушіння окрім електромагнітного випромінювання дозованої потужності та помірного термічного впливу (значно меншого порівняно з конвективним технологіями), тобто МХ сушіння є повністю екологічно чистим;

-нагрівання під впливом МХ поля проходить інтенсивно, швидко і безінерційно (при правильно створених умовах), що забезпечує продуктивність на порядок більшу порівняно з конвективним технологіями;

-процес сушіння проходить при значно менших температурах та добре піддається керуванню, внаслідок чого набагато повніше зберігаються якісні характеристики сировини (що дуже важливо для харчових продуктів);

-матеріал, що піддається обробці (його суха частка) нагрівається менше ніж волога яку він вміщає, відповідно непродуктивні витрати енергії при МХ сушінні є меншими;

-нагрівання буде більш інтенсивним у вологих ділянках і зменшуватись по мірі випаровування вологи, тобто воно саморегулюється в процесі сушки;

-конструктивно МХ сушарка це відносно простий та компактний апарат, складається з системи генерування МХ випромінювання та сушильної камери, при необхідності може легко масштабуватись до заданої продуктивності;

-внаслідок універсальності технології МХ нагрівання, така сушарка може додатково виконувати функцію стерилізації сировини, готової продукції або передпосівної активації зерна, простим вибором відповідного режиму на пульті керування (змінюючи програми роботи МХ генератора).

При такому солідному списку переваг виникає логічне запитання: чому ця технологія поширена лише в мікрохвильових печах? Відповідь достатньо проста. Ключовим елементом мікрохвильових печей є той самий магнетрон (генератор МХ поля), це досить складний прилад (фактично вакуумна лампа) гарантований термін роботи якого (для моделей, що використовуються в МХ печах) складає всього одну – дві тисячі годин. Для побутової техніки це відповідає декільком рокам експлуатації, а для промислового застосування – всього пару місяців нормальної роботи, та й потужність магнетронів такого класу складає близько 0,8 – 1,0 кВт, що недостатньо для установок з високою продуктивністю. Наявні на ринку промислові рішення для МХ сушки використовують МХ генератори зовсім іншого класу, які вартістю та складністю на порядки відрізняються від їх побутових аналогів.

Однак прогрес не стоїть на місці і сьогодні промисловість пропонує все більше відносно недорогих МХ генераторів з високими показниками надійності та потужністю достатньою для промислового використання. Поширення та здешевлення таких магнетронів дозволяє розробити на їх основі принципово нові сушильні апарати – ті самі сушарки третього покоління.

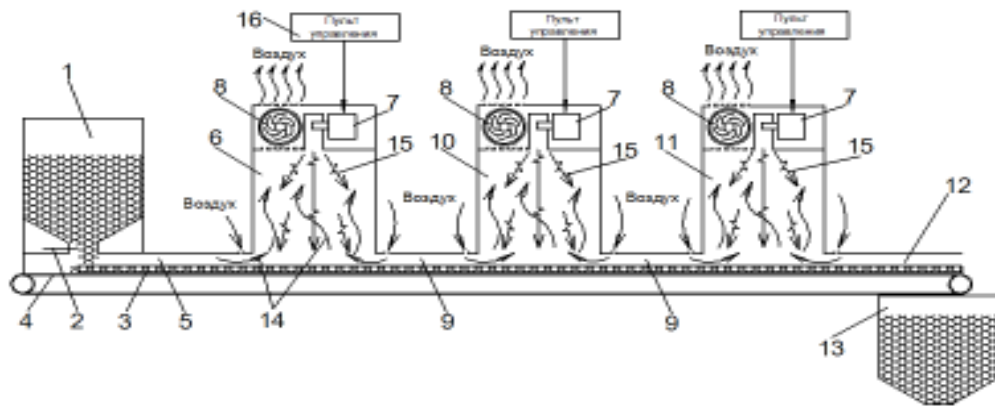
Розглянемо принципи роботи сушарок третього покоління. Нагрівання вологого матеріалу, наприклад зерна пшениці, здійснюється в середовищі МХ електромагнітного поля яке діє на потік вологого зерна в межах добре екранованої від витоків МХ випромінювання сушильної камери.

Так як швидкість нагрівання та вологовидалення у МХ сушильної камери значно вища, ніж у сушарки з конвективним способом нагрівання, продуктивність однієї камери може складати від декількох десятків кілограм до декількох тон на годину. Продуктивність однієї сушильної камери, як і її розміри, залежать від режиму роботи та характеристик використаного в конструкції камери магнетрона.

Кожна з сушильних камер в залежності від обраного для неї режиму роботи забезпечує видалення з потоку вологого матеріалу деякої кількості вологи. Самі сушильні камери можуть комбінуватись у послідовні та паралельні групи, а інтелектуальне керування режимом роботи кожної з камер забезпечить реалізацію гнучких сценаріїв обробки вологої сировини.

В МХ сушарках повітря не виконує функцію теплоносія а використовується лише для транспортування видаленої з матеріалу вологи. Це дає можливість значно зменшити втрати енергії, так як в такій системі нагрівати повітря для перенесення тепла непотрібно.

Детально аналізуючи принципи дії МХ сушарки можна дати відповідь на ще одне важливе питання: чи обов'язково видаляти вологу з зерна саме у вигляді пари? Особливості взаємодії МХ поля з вологою, що знаходиться в капілярах та внутрішніх шарах вологої зернівки, дозволяють розраховувати на можливість створення такого режиму роботи МХ поля при якому випаровування води в капілярах зернівки буде протікати у вигляді імпульсів заданої періодичності, спричиняючи при цьому «витискання» води з капілярів без повного її випарювання. Такий ефект, названий «бародифузійною» вже реалізовано у лабораторних дослідах, а при його відтворенні у промисловому обладнанні дозволить будувати установки з енергоефективністю недосяжною для конвективних способів сушки [3]. Звісно «бародифузійний» режим роботи сушарки потребує тонкого налаштування керуючої системи і глибокого знання процесів, що протікають у внутрішніх шарах зерна при його обробці потужним МХ полем.



а)



б)

а) конструкція; б) загальний вигляд;

Рис. 1. Мікрохвильова стрічкова сушильна установка ОНАХТ: а) конструкція; б) загальний вигляд.

Протягом декількох останніх років на кафедрі обладнання, процесів, апаратів і енергетичного менеджменту ОНАХТ реалізується дослідницька програма з проблематики сушіння рослинної сировини з використанням технологій мікрохвильового нагріву.

Досвід, отриманий при проведенні досліджень, доводить, що через велику кількість факторів, процес взаємодії МХ поля з вологою рослинною сировиною, вкрай складно піддається аналітичному аналізу. Саме тому основним напрямком робіт у дослідженні процесів МХ сушіння обрано шлях експериментального моделювання процесів, з подальшим аналізом результатів. Для дослідження процесу МХ сушіння, на кафедрі створена мікрохвильова сушильна установка (рис. 1).

Установка складається з: бункера для вологого матеріалу 1, з дозуючим пристроєм 2, стрічкового конвеєра 4, для транспортування шару матеріалу 3, через зони сушки, вхідного 5 і вихідного 12 шлюзових тунелів. Основою установки є камери мікрохвильової сушки матеріалу 6, 10 і 11, кожна з яких обладнана магнетроном (генератором мікрохвильового випромінювання) 7 і вентилятором 8. Камери з'єднані між собою шлюзовими тунелями 9. Також сушарка має бункер для обробленого матеріалу 13 і систему управління потужністю магнетронів сушильних камер 16.

Однією з наукових проблем, яка ще не має повного вирішення сьогодні, є режими обробки різних видів вологої сировини (наприклад зерна) в середовищі МХ поля. Наступною перспективою у розвитку технологій сушки є створення комбінованих способів вологовидалення, одним з найцікавіших варіантів є поєднання МХ способу сушіння з інфрачервоною (ІЧ) сушкою. Обидва способи дозволяють створити інтенсивний потік вологи в межах вологої зернівки, різниця полягає у глибині шарів на які здійснюється вплив. Якщо МХ випромінювання дозволяє створити інтенсивний (в ідеалі «бародифузійний») потік вологи з глибоких шарів зернівки, то ІЧ випромінювання дозволяє інтенсифікувати рух вологи у приповерхневих шарах. Такий комбінований вплив на процес перерозподілу (транспортування) вологи всередині вологих матеріалів, при економічних режимах впливу може бути рекордно енергоефективним при збереженні високої продуктивності процесу сушки.

Досягнутий рівень питомих витрат енергії при ІЧ сушінні становить 3,6 МДж на 1 кг випареної вологи. Використання мікрохвильових технологій в поєднанні з фільтраційним зневодненням може дати значення питомих витрат енергії менші, ніж 2,7 МДж на 1 кг видаленої вологи. Результати комбінованого, енергоефективного режиму сушіння можуть бути меншими ніж 2,0 МДж на 1 кг видаленої вологи, що в 3-4 рази нижче порівняно з існуючими сьогодні кращими зразками конвективних сушильних технологій [4].

В даний час в Україні виробників високоякісної сушеної продукції, отриманої за допомогою технологій МХ сушіння, практично немає. Прогнозувати практичні переваги використання МХ сушіння можна спираючись на досвід отриманий при впровадженні близької за показниками технології інфрачервоної сушки. Досвід ІЧ - сушіння в молочній, кондитерській та хлібопекарській промисловостях показує, що висушений продукт не критичний до умов зберігання, стійкий до розвитку мікрофлори. До одного року сухопродукти можуть зберігатися без спеціальної тари, при цьому втрати вітамінів залишається в межах 15%. Процес сушіння ведуть при температурах 40 ... 60 °С. Це гарантує високу якість готового продукту: відсутня деструкція клітинних оболонок, зберігаються вітаміни, не карамелізується цукор [5].

Не гірші результати від впровадження МХ сушіння (порівняно з ІЧ способом) може забезпечити той факт, що при аналогічній або вищій продуктивності, температура продукту виявляється нижчою ніж при ІЧ – сушінні, що може стати вирішальним фактором, наприклад для обробки термолабільної сировини.

Обладнання з використанням МХ нагріву може бути легко інтегроване у сучасні конструкції поточних сушарок та інших технологічних апаратів. Особливо цікавою виглядає можливість створення сушильного МХ-модуля з вертикальною компоновкою робочих зон і обробкою гравітаційно - рухомого шару сировини (рис. 2.).

В якості моделі використання такої конструкції можна запропонувати: окремі високопродуктивні сушильні модулі в складі конструкцій сушарок третього покоління, модулі надшвидкого нагріву потоку сировини, модулі для досушування сипучих матеріалів після обробки у традиційних сушарках, модулі для розігріву матеріалу перед основним процесом вологовидалення та модулі для стерилізації сировини в потоці.

Подібні конструкції МХ апаратів вже виробляються промисловістю і використовуються в апаратах для передпосівної активації зерна. Проте використання у подібній конструкції магнетронів високої потужності змусить переглянути механіку процесу, і ускладнити конструкцію для отримання більш контрольованого процесу взаємодії МХ поля та вологої сировини.

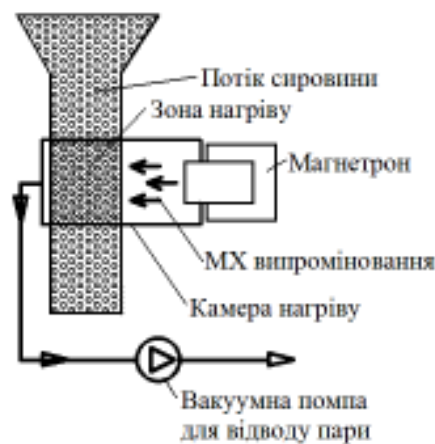
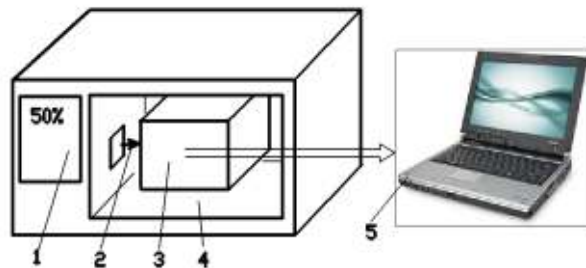


Рис. 2. Принципова схема однопоточного модуля МХ нагріву сипучої сировини.

Як і будь який складний процес технологія МХ – сушіння має недоліки, проте більшість з них є технічними проблемами, які обов'язково будуть вирішені в ході «доведення» технології на дослідних та промислових установках. Наприклад, одним з найбільш суттєвих недоліків МХ сушки вважається відносна нерівномірність температурного градієнту у об'ємі шару вологого матеріалу. Даний ефект пов'язують з перевідбиттями електромагнітних хвиль від стінок камери нагріву, внаслідок чого в об'ємі камери утворюються локальні «вузли» напруженості поля або зони з невисокою напруженістю. Такі «локалі» і приводять до місцевих «перегрівів» та «недогрівів» матеріалу. Уникнути таких «локалей» складно, проте їх вплив на матеріал можна мінімізувати шляхом перемішування шарів матеріалу під час

проходження потоку продукту через МХ камеру, а також підбором величини потоку матеріалу у відповідності до заданого режиму роботи сушарки.

Для експериментального дослідження процесів МХ нагріву сипучої сировини в щільному об'ємі виготовлено стенд (рис.3)



а)



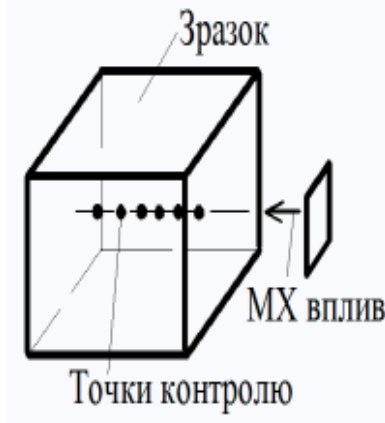
б)

а) Структурна схема: 1-панель керування МХ камери; 2-напрямок випромінювання; 3-касета з матеріалом; 4-МХ камера; 5-ПК для реєстрації параметрів. б) Загальний вид дослідного стенду;

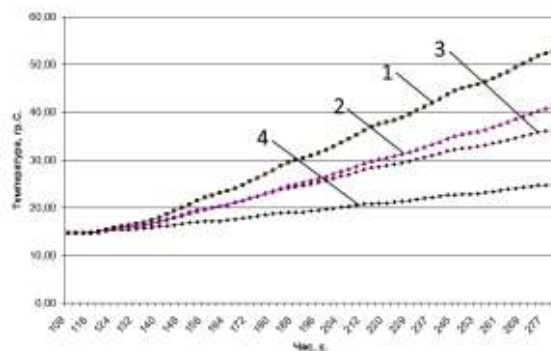
Рис. 3. Стенд для дослідження процесу об'ємного нагріву рослинного матеріалу в МХ полі.

Так за результатами проведених експериментів можна зафіксувати наявність нерівномірності температурного поля при нагріві об'ємного зразка у вигляді касети з зерном пшениці, що проявляється у перевищенні температури окремих точок на 5-15 % від усереднених показників. Нерівномірність нагріву не перевищує 2-4 °С, і має бути значно меншою для рухомого шару матеріалу, за умови використання декількох послідовно розташованих зон нагріву та при умові перемішування потоку.

Більш цікавою є інформація про динаміку нагріву матеріалу в об'ємі зразка на різних відстанях (глибини) відносно джерела випромінювання. Схема одного з дослідів та відповідна термограма контрольних точок об'єму, при потужності магнетрона на рівні 0,6 кВт, приведені на рис. 4.



а)



б)

а) Варіант розміщення датчиків; б) Термограми контрольних точок: 1-шар 30 мм; 2-шар 50 мм; 3-шар 90 мм; 4-шар 130 мм;

Рис. 4. Схема проведення та результати дослідів.

У більшості дослідів спостерігалась лінійна залежність температури шару від встановленої потужності магнетрона та глибини залягання даного шару. Досліди продемонстрували високу динаміку нагріву матеріалу. Так при 80% потужності магнетрона (0,6 кВт) на глибині близько 0,1 м температура зростала на 25 °С всього за 250 с. Саме такий «швидкий» нагрів забезпечує високі показники продуктивності МХ апаратів.

За результатами експериментального моделювання процесів МХ сушіння можна стверджувати, що навіть наявні на ринку магнетрони побутового класу (потужністю до 1,0 кВт.), можливо використовувати для обробки вертикального гравітаційно-рухомого шару рослинної сировини з вхідною вологістю в

межах 20 – 50 %. При зазначеній потужності, об'єм ефективної обробки складатиме близько 8000 см³., при цьому час обробки для розігріву об'єму до температури інтенсивного вологовидалення складатиме до 300 с., після чого потужність генератора може дозуватись відповідно до обраного режиму обробки.

Зважаючи на надвисоку, порівняно з існуючими способами, швидкість нагріву, технологія використання енергії мікрохвильового електромагнітного поля для обробки потоку рослинної сировини безперечно знайде своє місце у сучасних технологічних процесах.

Література

1. О. Г. Бурдо, “Эволюция сушильных установок”
2. О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, И. И. Яровой, А. А. Борщ, «Электромагнитные технологии обезвоживания сырья», 2012, Журнал «Проблемы региональной энергетики», издатель: Институт энергетики Академии наук Молдовы.
3. О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, В. Н. Бандура, И. И. Яровой, «Механодиффузионный эффект – новое явление в тепломассопереносе», ММФ, Минск, Белорусь, 2016, с. 224-228.
4. О. Г. Бурдо, «Энергетический мониторинг пищевых производств», - Одесса: Полиграф, 2008.
5. О. Г. Бурдо, «Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях», 2005, Инженерно-физический журнал. Минск (*Досвід ІЧ - сушіння в молочній, кондитерській та хлібопекарській промисловостях*)

УДК 66.974.434:66.048.5-982:536.248

EXPERIMENTAL STUDIES OF BOILING HEAT TRANSFER OF FOOD SOLUTIONS

Zykov A.V. Ph.D; Reznichenko D.N. postgraduate student; Bezbah I.V. Ph.D.
Odessa National Academy of Food Technology; Odessa; Kanatnaya Street, 112

ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ПИЩЕВЫХ РАСТВОРОВ

Зыков А.В. к.т.н, доцент; Резниченко Д.Н. аспирант; Безбах И.В. к.т.н, доцент.

Abstract. Vacuum evaporation is widely used in the food technologies. The equipment for this process is well known and methods of calculation and design of vacuum evaporators are described in literature as well. However, in some cases the accuracy of existing methods is not enough. The problem of designing the new, more efficient apparatuses that work in regimes, which are not usual, needs to clarify some dependencies. It concerns the problem of boiling heat transfer coefficient determination for such solutes as food products because of the high or sometimes extremely high viscosity of many food staffs is. To take into account properties of products many authors use the Prandtl number. However, determination of these properties exact values is not always possible especially it concerns the viscosity of Non-Newtonian fluids, which are the most of food staff. For experimental verification of heat transfer coefficient values, an apple juice was chosen. At first, the theoretical value was obtained with Tolubinskiy dependency using. The vapor bulbs grows rate and surface tension coefficient were solved as for water. The dependencies between the heat transfer coefficient and heat flux for apple juice with concentration from 15 to 50 Brix were obtained as result. There are several different equations to calculate the properties of apple juice depending on temperature and concentration and several resulting dependencies that differ from each other were obtained. The comparison with the experimental data that was obtained by authors made possible to choose the right equations for apple juice viscosity determination when the heat transfer calculation error did not exceed 20% that is standard error for used dependency and for many others. To reduce this error on the base of obtained experimental data the correction coefficient was calculated. Therefore, the equation to calculate the heat transfer coefficient for boiling apple juice where maximum error did not exceed 5% was obtained. The experimental research was conducted under atmospheric pressure. To obtain the value of heat transfer coefficient in vacuum condition the Tolubinskiy dependency can be used or addition experiments should be conducted. It depends of required accuracy level.

Аннотация В статье рассмотрена проблема определения коэффициентов теплоотдачи при кипении концентрированных растворов пищевых продуктов. Проанализированы возможности использования для этого известных зависимостей, которые доступны в литературе и проведено сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований при кипении концентрированного яблочного сока, проведенных авторами.

Keywords: boiling, heat exchange, evaporation, concentration, vacuum.

Ключевые слова: кипение, теплообмен, выпаривание, концентрирование, вакуум.

Introduction.

One of the energy-intensive sectors of the food industry of Ukraine is the heat treatment of food liquids and food concentrates. In Ukraine the production of concentrates annually evaporated about of 1-1.5 mln. ton of water, which in monetary equivalent is 300-400 mln. UAH. There are two typical problems of concentration processes: it is a high energy costs and loss of thermally labile component materials.

One of the methods in food production is the organization of evaporation of the initial solutions in a vacuum. The main problem is to disinfect the initial mass as much as possible and to preserve its organoleptic and sanitary-hygienic qualities. These conflicting requirements can be solved by organizing processes of concentration in a vacuum with short-term exposure to high temperatures and rapid cooling. Such technology requirements significantly complicate the engineering implementation, but are successfully solved using evaporation in vacuum evaporators and rapid cooling by natural means (ice water or cooled gases). This means that traditional technologies that implement such conflicting demands are burdened by a significant increase in energy use. Therefore, the study of effective ways to reduce energy costs, their optimization and practical application look like actual research areas in the field of food technology improving. A possible way of this can be an introduction of a heat pump to the traditional technology.

However, in the process of optimization of constructive and regime parameters of new designs of vacuum evaporators (VE) with heat pumps, the main goal was to determinate the heat transfer coefficient from the evaporator surface to the food product. Nowadays, the process of heat transfer during boiling of liquids has been studied sufficiently and the number of equations for determining the heat transfer coefficient is measured in tens [1]. The same array of experimental data on the coefficients of heat transfer during the boiling of various liquids is satisfactorily described by the empirical formulas in relation to the influence of surface tension, viscosity, evaporation heat, and other properties of the liquid, which is explained in [2] by the interdependence of various thermophysical properties of liquids. In [3], the most well-known dependencies which describe the process of heat transfer with sufficient reliability and theoretical justification at the boiling of liquids are presented and analyzed. There are also models in which the surface structure of the heater is taken into account by means of fractal dimensions [4]. It was noted in [5] that the absence of a closed mathematical description of the process and the abundance of factors influencing the heat transfer during boiling make the choice of generalized variables arbitrary. It is obvious that the choice of the dependence for determining the heat transfer coefficient should be determined by its reliability and convenience of practical use. In our case, it is necessary to take into account that boiling of not a pure liquid takes place, but a solution as many liquid food products. Despite the fact that there are many studies of the liquid mixtures boiling, the boiling of solutions of nonvolatile components has been paid attention only from the point of view of determining the vapor pressure over the surface of the solution. However, in spite of this, the reference books have quite complete information only on the boiling points of solutions of sugar and NaCl. For other food solutions, the information is incomplete and, in general, is of a private nature. Especially it concerns solutions with a high concentration of solids. A feature of many food solutions is their increased and often very high viscosity. However, according to Tolubinsky [6], the internal boiling characteristics of the solutions are determined by the properties of solvent, the Prandtl number (Pr) practically does not affect them, and the heat transfer during boiling of the solutions is generally characterized by the same laws as the heat exchange in the boiling of pure liquids. Therefore, there is no difficulty in using for the solutions the similarity equation (1).

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 75\text{K}^{0.7} \text{Pr}^{-0.2} \\ \text{Nu} &= \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho_v)}} \\ \text{K} &= \frac{q}{r\rho_v d_0 f} \end{aligned} \tag{1}$$

where: Nu – Nusselt number, Pr – Prandtl number, α – heat transfer coefficient, λ – heat conductivity coefficient, σ – surface tension coefficient, g – acceleration of gravity, ρ – liquid density, ρ_v – vapor density, q – heat flux, r – latent heat of vaporization, d_0 – vapor bubble diameter, f – frequency of vapor bubble formation.

Substituting in the equation 1 the properties of water and steam at a boiling point of 100 °C, we will obtain:

$$\alpha = 3.46 \times q^{0.7} \tag{2}$$

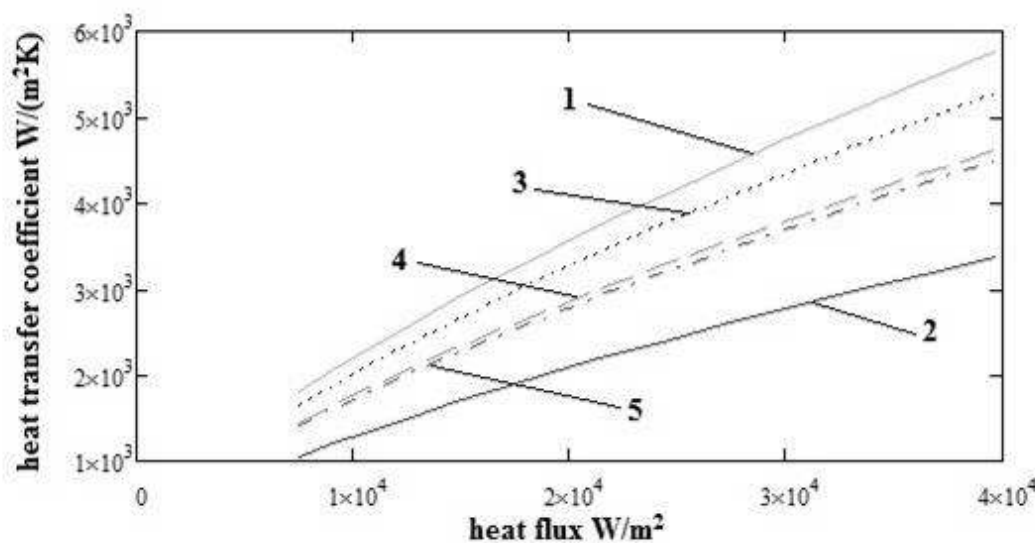
It was also noted in [6] that the growth rate of vapor bubbles $\omega'' = d_0 f$ during boiling of aqueous solutions is determined by the properties of the solvent (water) and its vapor and depends very weakly on the properties of

the solute, viscosity and Prandtl number of the solution. Therefore, the value of ω'' upon boiling of aqueous solutions can practically be considered equal to ω'' upon boiling of water. Thus, in order to use equation 1 for determining the heat transfer coefficients for the boiling of solutions, it is necessary to know their thermophysical properties and the magnitude of physic-chemical depression.

Determination of the heat transfer coefficient of food solutions according to the Tolubinsky formula.

Let us consider the possibility of using formula 1 to calculate the heat transfer coefficient of concentrating apple juice. As noted above, for this it is necessary to know the thermophysical characteristics of apple juice and its boiling temperature. The main source of the food products thermophysical properties data are the Chubik [7] and Ginzburg [8] handbooks. Apple juice is quite common and its properties are available in the reference books [7, 8], and apparently, there should be no problems in calculating the heat transfer coefficient. However, trying to determine the density of apple juice according to [7], we have seen the dependence of the juice density on the concentration of solids only at a temperature of 20 °C. A more general dependence of density from concentration and temperature for different juices is presented in [8]. The viscosity and thermal conductivity of apple juice with concentration of solids up to 50% can be also determined from the dependences from [7]. The heat capacity of apple juice at 15% of dry matter can be determined by [9]. With an increase in the concentration of dry substances, the heat capacity of the juice is expected to decrease, as shown in [9] for the specific heat of grape juice. The value of the coefficient of surface tension for apple juice in the literature was not found. The values of the coefficient of surface tension of pomegranate juice in the temperature range 10-90 °C and concentrations of 15-45% are presented in [10]. It is established that the coefficient of surface tension of juice σ decreases with increasing temperature and concentration. Analysis of the data from [10] shows that at low temperatures the coefficient of surface tension of the juice is less than the coefficient of surface tension of water. With increasing temperature, the value of the surface tension of the juice approaches the value of this coefficient for water, and at low concentrations, it exceeds it. The maximum difference in values did not exceed 6%. Because of this, it was decided to use the value of the coefficient of surface tension of water in calculations.

By substituting the values of the thermophysical properties of the juice in equation 1, we obtained the dependences of the heat transfer coefficient for the boiling of apple juice with a concentration of 10-50% at atmospheric pressure. The obtained dependences are shown in Fig. 1.



1-water, 2-juice at a concentration of 15%, 3-juice at a concentration of 25%, 4-juice at a concentration of 40%,
5-juice at a concentration of 50%

Fig.1. Dependence of the heat transfer coefficient of apple juice on the heat flux at atmospheric pressure, calculated according to the Tolubinsky formula;

In general form, these relationships can be represented by an equation of the form:

$$\alpha = Ac \times q^{0.7} \quad (3)$$

where Ac is a constant, depending on the properties of the juice and water vapor.

For atmospheric pressure, the dependence of Ac on the juice concentration is shown in Fig. 2.

As can be seen, the dependence of Ac on the concentration, shown in Fig. 2, has the form of a broken curve, which is due to the non-smooth crosslinking of the formulas for determining the viscosity of the juice at various concentrations. Especially noticeable is the jump with a change in viscosity from 15% to 20%. If we exclude from the calculation the dependence for viscosity, taken from [9] and use only the dependence for concentrated juices, we obtain a smoother curve.

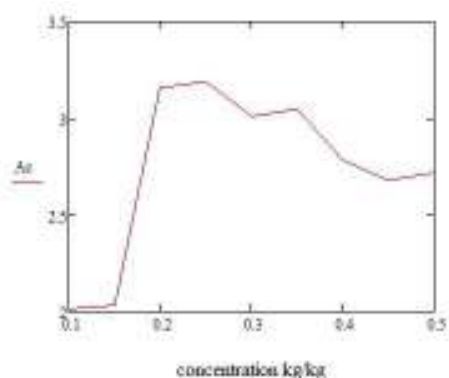
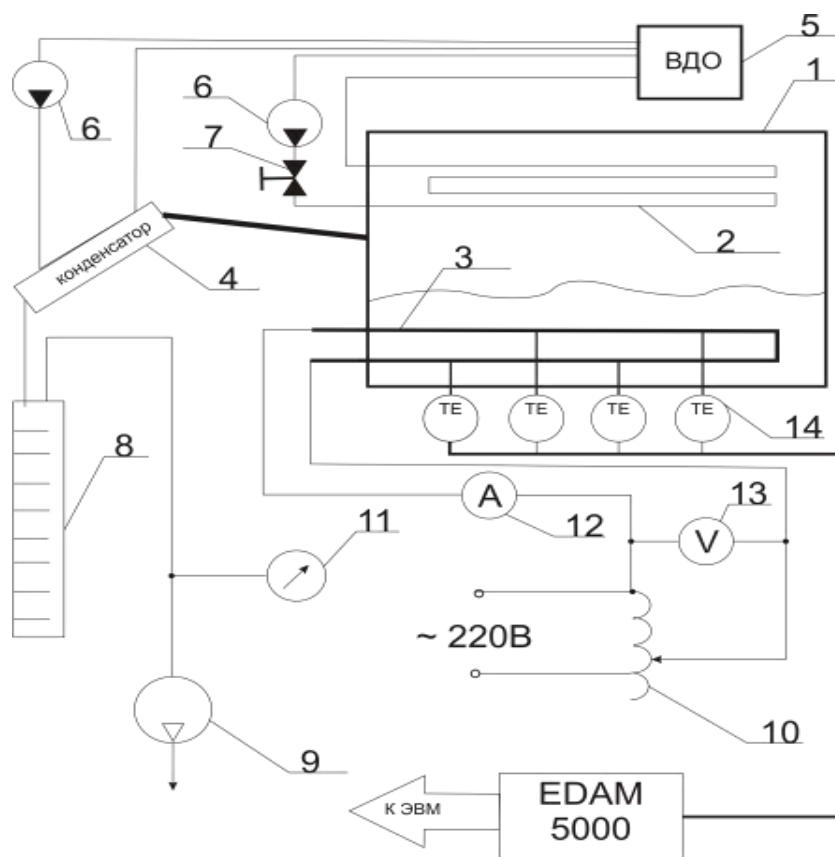


Fig. 2. Dependence of Ac on the concentration of juice

As can be seen from the graphs 1 and 2, the heat transfer coefficient at boiling of apple juice is less than its value at the boiling point of water and has a maximum at a concentration of dry matter in the juice of about 25%. The calculated values are doubtful, especially in the field of low concentrations of solids in juice due to the existing ambiguity in determining the properties of the juice. There is also no exact data on the rate of growth of vapor bubbles during boiling of apple juice, which can also affect the reliability of the calculated values. Check the degree of deviation of the calculated data from the actual values of the heat transfer coefficient by experiment.

Description of the experimental setup and experimental procedure.

To test the calculated heat transfer coefficients experimentally, a laboratory installation was created (Figure 3), the main element of which was the glass container 1. In the lower part of the container there is an electric heater 3, and in the upper part there is a tubular heat exchanger 2. In the heat exchanger 2, the pump 6 is supplied with cold water from the water cooling unit 5.



1 - volume, 2 - heat exchanger, 3 - electric heater, 4 - condenser, 5 - water cooling plant, 6 – circulating pump 7 - valve, 8 - measuring container, 9 - vacuum pump, 10 - LATR, 11 - manometer, 12 - ammeter, 13 - voltmeter, 14 - thermocouple.

Fig. 3. Scheme of the experimental setting.

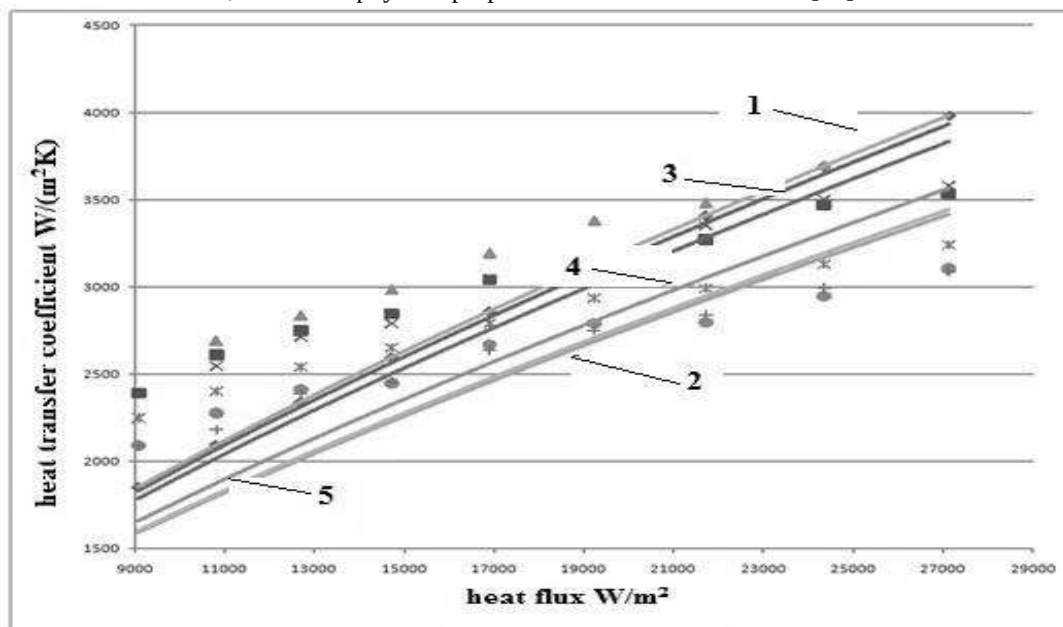
The heat transfer coefficient was defined as the ratio of the heat flux of the electric heater emanating from the unit surface to the liquid to the temperature difference between the surface of the heater and the liquid. To determine this temperature difference on the surface of the heater and in the liquid, there are thermocouples connected to the EDAM 5000 secondary converter, which transmits temperature values to the computer via a USB interface. The value of the heat flux was changed with the help of LATR. The onset of boiling was recorded visually and by stabilizing the temperature of the liquid. The setting, allows to carry out experiments both at atmospheric pressure and under vacuum. The instrumental error in determining the heat transfer coefficient does not exceed 6%.

For the experiments apple juice was used with an initial concentration of 12%. After carrying out the heat transfer coefficients and the temperature depression of this juice, the supply of cooling water to the heat exchanger 2 was closed by means of the valve 7, thereby stopping the condensation of the vapor inside the container. The secondary vapor was condensed in the condenser 4 and collected in a measuring container 8. Upon reaching the next preset juice concentration, the valve was opened, and the process was carried out. The changes were made in the range of concentration changes of 12-50% and the heat flux density of 6 - 47 kW/m².

Results of the experiments and comparison with calculations.

As a result of the experiment, the dependences of the heat transfer coefficient on the density of heat flux and concentration of apple juice at atmospheric pressure were obtained, presented in Fig. 4.

As can be seen, the experimental dependences of the heat transfer coefficient on the apple juice concentration have a maximum in the concentration range of 20-25%. Their character and the value of the maximum points coincide with the calculated dependences presented in Figures 2. A visual comparison of the experimental and calculated dependences is shown in Fig. 4. The graphs confirm the coincidence of the predicted influence of the concentration on the heat transfer coefficient. At the same time, there is some discrepancy between the numerical values of calculated and experimentally determined heat transfer coefficients. In the main in the range of heat flux densities from 12 to 50 kW/m², the relative divergence does not exceed 20%, which corresponds to the accuracy of calculations using formula (1). The principal increase the accuracy of the general formula is not advisable due to the fact that the effect on heat transfer during boiling "weak" factors (small impurities surface-active additives, impurities and the dissolved gases, specific microgeometry of boiling surface associated with the structure of the material, technology of preparation and surface treatment, the adsorption properties of the surface, its homogeneity, wet ability, etc.) are greater than the effect of "strong" factors such as the gravity intensity level field, vibration, organization of circulation and forced fluid flow, application of an electric field, the thermophysical properties of the material surface [11].



1-water, 2-juice at a concentration of 15%, 3-juice at a concentration of 25%, 4-juice at a concentration of 40%, 5-juice at a concentration of 50%

Fig. 4. Comparison of the calculated and experimental dependences of the heat transfer coefficient on the density of the heat flux at different concentrations of apple juice.

However, to optimize the evaporators the formula 3 can be used with an additional correction factor. This coefficient is obtained by dividing the values of the heat transfer coefficient obtained experimentally by the values calculated from formula 3. Then the modified equation for determining the heat transfer coefficient at boiling of apple juice has the form:

$$\alpha = K_K \times \alpha_c \times q^{0.7} \quad (4)$$

where K_K is the correction coefficient.

Differences in K_K values for different concentrations of apple juice fluctuate within 5% relative to the average value. Consequently, these oscillations are within the error of the experiment.

Conclusions

As a result of the conducted studies, it was established that for the determination of the heat transfer coefficient at boiling of apple juice with a concentration of up to 50% at atmospheric pressure, using the Tolubinsky formula (1), the growth rates of steam bubbles and the surface tension coefficient determined for water at the appropriate temperature can be used. In order to obtain values of the heat transfer coefficient with greater accuracy, one can use partial dependencies, such as equation 4. It should also be taken into account that at atmospheric pressure the boiling point of the juice exceeds 100 ° C. According to [7] at such temperatures, the change in the viscosity of apple juice with increasing concentration to 50% is negligible. Under conditions of a deep vacuum, at boiling temperatures of 30-40 ° C, the viscosity change is already considerable and amounts to 800-1300% of the initial viscosity. Also, one should take into account the possible change in the coefficient of the surface tension of the juice in the region of high concentrations. Thus, it makes sense to determine experimentally the heat transfer coefficients at boiling of juice in the region of high concentrations (more than 50%) at boiling points of 60 -30 ° C.

References

1. Yagov, V. V. (1995) Nauchnoe nasledie D. A. Labuntsova i sovremennye predstavleniya o puzyr'kovom kipenii. *Teploenergetika*, 3, 2–10.
2. Labuntsov, D. A. (1960) Obobshchennye zavisimosti dlya teplootdachi pri puzyr'kovom kipenii zhid-kostej. *Teploenergetika*, 5, 76–81.
3. Ovsyannik, A. V. (2012) Modelirovanie protsessov teploobmena pri kipenii zhidkostej. Gomel': GGTU im. P. O. Sukhogo, 284.
4. Solodov A.P. (1999) Computer Model of Nucleate Boiling In Convective Flow and Pool Boiling. Taylor & Francis. Philadelphia, 231–238
5. Yagov, V. V (1988). Teploobmen pri razvitom puzyr'kovom kipenii zhidkostej. *Teplo-energetika*, 2, 4–9.
6. Tolubinskij V. I (1980) Teploobmen pri kipenii. Kiev: Nauk. dumka., 316.
7. Chubik, I.A.; Maslov, A.M. (1970). Spravochnik po teplofizicheskim konstantam pishhevykh produktov i polufabrikatov. M.: Pishhevaya promyshlennost'.. 184.
8. Ginzburg A.S. (1980). Teplofizicheskie kharakteristiki pishhevykh produktov. Spravochnik. Izdanie vtoroe, dopolnennoe i pererabotannoe. M.: Pishhevaya promyshlennost', 288.
9. V. P. Babarin, N. N. Mazokhina-Porshnyakova, V. I. Rogachev (1987) Spravochnik po sterilizatsii konservov M. : Agropromizdat., 270.
10. Magerramov M.A. (2006), Temperaturoprovodnost' i poverkhnostnoe natyazhenie Granatovogo soka pri temperaturakh 10–90°C. *Izv. vuzov. Pishhevaya tekhnologiya*, 5, 68–71.
11. Labuntsov, D. A. (1974), Sovremennye predstavleniya o mekhanizme puzyr'kovogo kipeniya zhidkostej // Teploobmen i fizicheskaya gidrodinamika. M. Nauka, 98–115.

УДК 66.063.94:045

БАЛАНСОВІ, ЕНЕРГЕТИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФАЗОВІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИМОРОЖУВАННЯ СОКІВ

Бурдо О.Г., д-р техн.наук, професор, Мординський В.П. к.т.н. ,доцент,
Одеська національна академія харчових технологій

Давар Ростами Пур
фирма D.R.P., Iran, Teheran

BALANCING, ENERGY, KINETIC AND PHASE MODELS OF PROCESSES OF CLEANING SOURCES

Burdo O.G., doctor of technical sciences, professor, Mordinsky V.P. Ph.D., docent,
Odessa National Academy of Food Technologies
Davar Rostami Pur Firm D.R.P., Iran, Tehran

Abstract: The work is devoted to the study of block freezing devices for concentrating pomegranate juice. The prospect of concentrated juices, the place of pomegranate juice on the market is discussed. The traditional principles of concentration of juices in evaporators are analyzed. Disadvantages of evaporation processes and attractiveness of methods of low temperature dehydration of solutions (cryoconcentration) are shown. The energy and structural advantages of block freezing equipment are determined. This methodology for calculating the balance models of crystallization processes and separation of the ice block is given. The method of experimental study of the conditions of the phase equilibrium in the crystallization of pomegranate juice is given. An experimental stand was developed on the basis of cryostat and the temperature of crystallization was determined depending on the concentration. As a result, a cryoscopic line for pomegranate juice was obtained in the range of concentrations of dry matter of 3 - 50%. The methods of energy management have analyzed the economic efficiency of evaporation technologies and the innovative technology of block freezing. It is shown that the energy of innovation technology is better. The influence of the temperature of the crystallizer, the initial concentration of pomegranate juice, the volume of solution in the concentrator on the intensity of crystallization of the ice block has been determined. The dependences of ice block parameters on structural factors of the crystallizer and the concentrator are analyzed. The specificity of the separation process was studied, the influence of the initial concentration and temperature regimes on the parameters of the separation process (volume of effluents and their concentration) was obtained. The experimental sample of the block freezing device has been tested in concentrate of pomegranate juice. High-quality concentrates of pomegranate juice from 48 obrix were obtained. The results of the work give the opportunity to design industrial installations of necessary performance. The economic attractiveness of the technology of concentrating pomegranate juice in block freezing devices, which is determined by technological, energy and logistic aspects, is analyzed.

Анотація: Робота присвячена вивченню пристроїв блочного заморожування концентрату гранатового соку. Обговорюється перспектива концентрованих соків, місце гранатового соку на ринку. Проаналізовані традиційні принципи концентрації соків у випарниках. Показані недоліки процесів випаровування та привабливості методів низької температури зневоднення розчинів (кріоконцентрації). Визначено енергетичні та конструктивні переваги блочного морозильного обладнання. Дана методика для розрахунку балансових моделей процесів кристалізації та розділення льодового блоку. Наведено метод експериментального вивчення умов фазової рівноваги при кристалізації гранатового соку. Експериментальний стенд був розроблений на основі криостату та визначали температуру кристалізації в залежності від концентрації. У результаті отримано кріоскопічну лінію для гранатового соку в діапазоні концентрацій сухої речовини 3 - 50%. Методи енергетичного менеджменту проаналізували економічну ефективність технологій випаровування та інноваційну технологію блочного заморожування. Показано, що енергія інноваційної технології є кращою. Визначено вплив температури кристалізатора, початкової концентрації гранатового соку, обсягу розчину в концентраторі на інтенсивність кристалізації льодового блоку. Проаналізовані залежності параметрів льодового блоку від структурних факторів кристалізатора та концентратора. Вивчено специфіку процесу поділу, отримано вплив вихідних концентрацій та температурних режимів на параметри процесу сепарації (об'єм потоків і їх концентрація). Експериментальний зразок блочного морозильного

апарату випробувано в концентраті гранатового соку. Отримано високоякісні концентрати гранатового соку з 48 об'єктів. Результати роботи дають можливість проектувати промислові установки з необхідною продуктивністю. Проаналізована економічна привабливість технології концентрації гранатового соку в блочних морозильних апаратах, яка визначається технологічними, енергетичними та логістичними аспектами.

Key words: cryoconcentration, balance models, block freezing, cryoscopic line, kinetics of crystallization and separation, pomegranate juice.

Ключові слова: кріоконцентрування, балансові моделі, блокове виморожування, кріоскопічна лінія, кінетика кристалізації та сепарування, гранатовий сік.

Вступ. На ринках харчових продуктів зростає попит на різноманітні соки. Крім соків прямого віджимання збільшується сектор відновлювальних соків. Такі соки виготовляють із концентрованих шляхом додавання до них питної води. Виробників концентрований сік приваблює тим, що він довго зберігає свій харчовий потенціал, потребує менших об'ємів при зберіганні та зменшує витрати при транспортуванні.

Аналіз літературних джерел та формулювання мети досліджень. Свіжовичавлений сік граната є одним з найцінніших продуктів харчування, а його біологічна активність набагато вище, ніж у багатьох інших плодових і ягідних соків. В його складі багато органічних кислот, і найбільше лимонної - тому гранатовий сік має такий виражений, характерний смак; є амінокислоти, замінні і незамінні, водорозчинні поліфеноли і вітаміни, з яких найбільше аскорбінової кислоти і вітамінів групи В, потім А, Е, РР; є також фолацин - природна форма фолієвої кислоти. Крім того, є і мікроелементи: фосфор, кальцій, магній, калій, залізо, натрій; дубильні і пектинові речовини. Калію в гранатовому соку більше, ніж в будь-якому іншому фруктовому соку [1].

Гранатовий сік засвоюється дуже легко, і в ньому зберігаються всі корисні речовини, присутні в цілому гранаті. Смак у гранатового соку теж незвичайний, злегка терпкий, але освіжаючий і приємний. Поліфеноли, що містяться в свіжовичавленому соку граната, мають виражену антиоксидантну активність [2]. Коли мова заходить про захист від вільних радикалів, то зазвичай згадують червоне виноградне вино, зелений чай, журавлину і лохину, але, виявляється, гранатовий сік в цьому відношенні більш активний.

Концентрат - це згущена форма фруктового соку, отримана методом випаровування або заморозки [3]. Далі методом відновлення з концентрату отримують фруктовий сік, який не втрачає своїх корисних якостей і зберігає в своєму складі вітаміни. Як правило, концентрують соки випаровуванням. Це розповсюджений, простий засіб, для його реалізації використовують надійне обладнання. Але, термічна обробка сировини частково псує продукт, зменшує його поживні речовини [4]. Тому сучасні технології концентрування потребують удосконалення [1, 5, 6]. Перспективним шляхом є перехід технологій концентрування на низькотемпературні режими, використання обладнання блокового виморожування [6]. Метою роботи було отримання статичних моделей (балансових, енергетичних та умов фазової рівноваги) і кінетичних закономірностей процесів формування блоку льоду та його сепарування при виробництві висококонцентрованого гранатового соку за технологією блокового виморожування. Робота проводилась в лабораторіях кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту.

Результати досліджень та їх обговорення. Першим етапом роботи є визначення статичних моделей процесу кріоконцентрування соку, до яких відносяться балансові моделі та термодинамічні моделі фазової рівноваги в системі «розчин - лід» [5]. Для апаратів блокового виморожування [6] балансові моделі мають визначати співвідношення матеріальних балансів процесів кристалізації та сепарування та рівняння теплового балансу.

Розглянемо балансові моделі процесу блокового виморожування. На вхід до кристалізатора подається сік з початковою концентрацією X_n та масовим розходом G_n (рис.1).

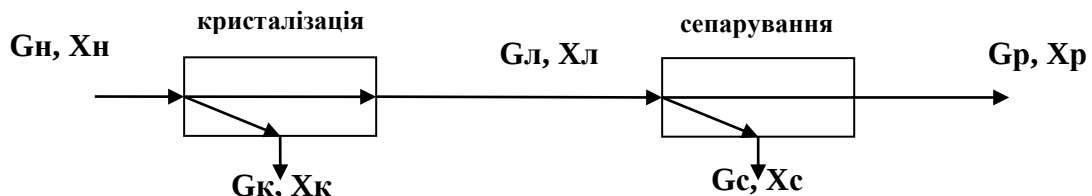


Рис.1. Схема матеріальних потоків.

Із концентрату виходить розчин з концентрацією X_k та масовим розходом G_k та лід, витрати якого G_l . В порах льоду є розчин, концентрація якого X_l . Після сепарування відділяються стоки, із розходом

Гс та концентрацією Хс. Розплав льоду має параметри: Гр, Хр. На практиці легко вимірюються параметри: Гн, Хн, Гк, Хк, Гс, Хс. Інші параметри визначаються із системи рівнянь.

Для процесу кристалізації:

$$\left. \begin{aligned} G_k + G_l &= G_n \\ G_k X_k + G_l X_l &= G_n X_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Із першого рівняння в (1) знаходиться Гл, яке підставляється у друге рівняння системи (1). Після спрощень визначається вміст сухих речовин в блоці льоду:

$$X_l = \frac{G_n X_n - G_k X_k}{G_n - G_k} \quad (2)$$

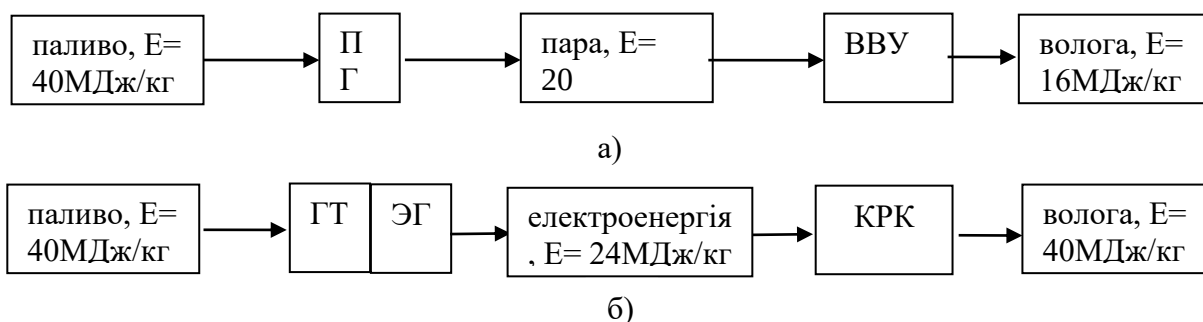
Для процесу сепарування:

$$\left. \begin{aligned} G_c + G_p &= G_l \\ G_c X_c + G_p X_p &= G_l X_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Значення Гл й Хл отримано із розрахунків кристалізатора. Аналогічно (2) визначаються втрати концентрату із розплавом льоду:

$$X_p = \frac{G_l X_l - G_c X_c}{G_l - G_c} \quad (4)$$

Енергетичні баланси Концентрування має проводитись так, щоб продукт мінімально змінювався. При випаровуванні взвесі та колоїдні речовини (пектинові, білкові та дубільні) концентруються у поверхні нагріву та викликають локальний перегрів та пригорання. Цукри карамелізуються й дають потемніння із-за реакції Майяра. Вітаміни, ферменти, фенольні речовини чутливі до теплоти, вони частково окислюються та змінюються. Летучі ароматичні речовини вилучаються разом із парою, що приводить до втрат характерного фруктового запаху. Тому кріоконцентрування гарантує менші втрати поживних властивостей сировини. Більш за те, концентрування виморожуванням економічні за випаровування. Так, на випаровування 1 т води витрачається $26,0 \cdot 10^5$ кДж теплоти, для кристалізації 1 т води необхідно відвести $3,33 \cdot 10^5$ кДж. Детальний аналіз проведемо методами енергетичного менеджменту [5], та порівняємо традиційні схеми випаровування із інноваційною технологією блокового виморожування. Оскільки ці схеми використовують різні джерела енергії, аналіз зведемо до визначення ефективності використання первинного палива органічного походження із теплою згоряння 40 МДж/кг . Методологія енергетичного менеджменту ґрунтується на системному аналізі всього технологічного ланцюга «первинне паливо – його конверсія у відповідні види енергії – мережа – споживач». В технологічних комплексах що аналізуються елементи зосереджено компактно, тому вплив мереж не враховується (рис.2).



а) – традиційне випаровування; б) - кріоконцентрування

Рис. 2. Конверсія енергії в технологіях зневоднення (всі параметри приведені до 1кг палива):.

На рис.2 прийняті наступні позначення: ПГ - парогенератор; ВВУ – вакуум-випарна установка; ЕГ – електрогенератор; ГТ – газова турбіна; КРК - кріоконцентратор. В розрахунках прийнято: енергетичний ККД перетворення палива в електричну енергію на газотурбінних станціях 60%; а електричний холодильний коефіцієнт 1,5 – 2.

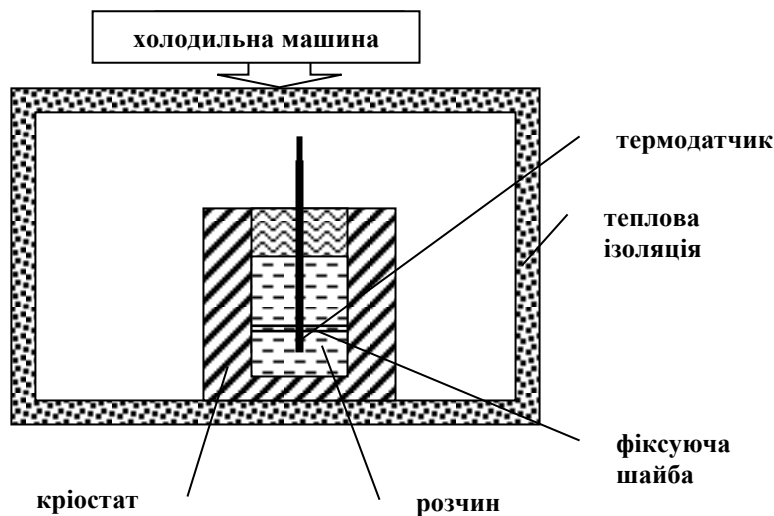
Наведені оцінки свідчать про енергетичні та економічні переваги апаратів блокового виморожування (рис.2).

Фазові рівноваги гранатового соку. Концентрація сухих речовин гранатового соку вимірювалась за допомогою TDS метра. Тарировка TDS-метра проводилась за традиційною методикою шляхом

висушування розчину в сушильній камері до постійної ваги. Для зважування бюкс та визначення концентрації за допомогою сушіння використовувались ваги RADWAG AS 220 / C, які мають дискретність - 0,0001 г.

Умови термодинамічної рівноваги системи «гранатовий сік - лід» мають визначатися по значенням криоскопічних температур. В доступних літературних джерелах такі залежності не знайдено. Відомо, що процес утворення твердої фази характеризується стрибком температури в об'ємі для насичених розчинів [5]. Фіксація цього стрибка і передбачається в стенді для визначення криоскопічних температур (рис.3). Основним елементом стенду є кріостат. Це металевий блок з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності і сумісного з досліджуванним продуктом. У блоці висвердлюється відкрита гільза, в яку заливають продукт.

По центру гільзи розташовується датчик, який центрується спеціальною фіксуючою шайбою, яка виготовлена з тонкого нетеплопровідного матеріалу. Датчик заводиться в герметичний металевий капіляр і підключається до планшета або комп'ютера, де попередньо встановлена програма для фіксування даних.



Осередок кріостату виготовлено з теплопровідного металу, він має форму циліндра із стінками завтовшки 40мм. Така конструкція сприяє згладжуванню флуктуацій температур всередині об'єму рідини. Для проведення дослідження фазової рівноваги готувалися розчини гранатового соку з певною масовою концентрацією. У робочу зону осередку відбирали пробу розчину в кількості 2 см³ і розміщували в ній датчик так, щоб він знаходився в середині об'єму рідини (рис.3).

Рис.3. Схема стенду для визначення криоскопічних температур.

Програма криоскопічних досліджень включала визначення значень криоскопічних температур для концентрацій гранатового соку $X = (3; 6; 12; 16; 20; 25; 30; 35; 38; 40; 45; 50; 65)\%$. Деякі графічні залежності наведені на (рис. 4).

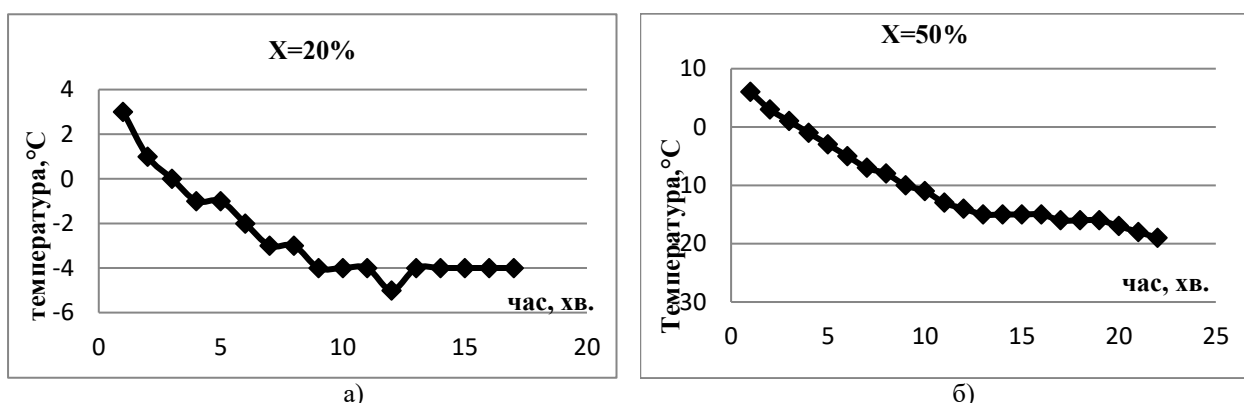


Рис. 4. Криоскопічні залежності гранатового соку.

За результатами експериментальних досліджень побудовані графічні залежності впливу концентрації на характер процесів охолодження розчинів, утворення льоду і його переохолодження. Лінія постійної температури і відповідала значенням криоскопічної температури. Методика експериментальних досліджень заснована на процесі регулярного відведення енергії від деякого об'єму рідини. Послідовно реєструються температури рідкої фази, встановлюється найменша температура

гідратної фази, фіксується скачок температури, рівень температур, при якому відбувається фазовий перехід, і температурний режим переохолодження твердої фази. Важливо при проведенні дослідів встановити мінімальну температуру гідратного стану. Саме при цих температурах і відбувається утворення твердої фази. Рівень цих температур, тривалість процесу формування блоку льоду залежать від концентрації розчину. Отже, експериментальний стенд повинен забезпечити організації цих процесів і коректне вимірювання температури.

Точність вимірювання кріоскопічних температур була не нижче $0,1^{\circ}\text{C}$. Надійна теплова ізоляція камери, де розташовано кріостат, забезпечує рівень температур в осередку до мінус 25°C .

Середні значення температур процесів льодоутворення використані для побудови узагальненої залежності цих температур від концентрації розчину. Сукупність цих точок і становить кріоскопічні криву (рис.5).

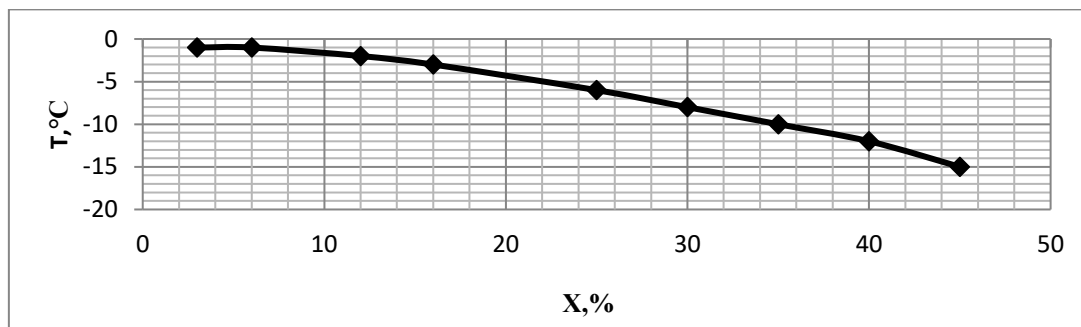


Рис.5. Кріоскопічна крива гранатового соку.

Отримана залежність необхідна для визначення рушійної сили процесу кристалізації при виморожуванні гранатового соку і для розрахунку коефіцієнтів масопереносу.

Кінетика кристалізації. Досліди по визначенню параметрів процесу кристалізації проводились на стенді, основними елементами якого були пластинчаті кристалізатори, концентратор та холодильна машина. Кристалізатори являлись випарниками холодильної машини, на них утворювався блок льоду. Вимірювальний блок включав мановакуметр, прилади для визначення витрат енергії, пуску, зупинки та включення системи відтайки блоку льоду від поверхні кристалізаторів. Смість соку, що заповнював концентратор, дорівнювала до 20л. Періодично вимірювались ключові параметри процесу: об'єм розчину, розміри блоку льоду, концентрація розчину, температури поверхні кристалізатора, розчину та блоку льоду. Концентрація визначалась цифровим рефрактометром, температури – тепловізором.

На основі дослідних даних побудовано залежності кінетики формування блоку льоду. Визначено вплив температури кипіння холодильного агента у випарнику на швидкість росту об'єму льоду. Зниження температури кипіння з -15°C до -18°C підвищило інтенсивність кристалізації на 9%. Значний вплив на інтенсивність кристалізації має початкова концентрація соку. Так, при зростанні концентрації із 9 % до 28% питома величина об'єму льоду до одиниці поверхні кристалізатора підвищується майже вдвічі (рис.6).

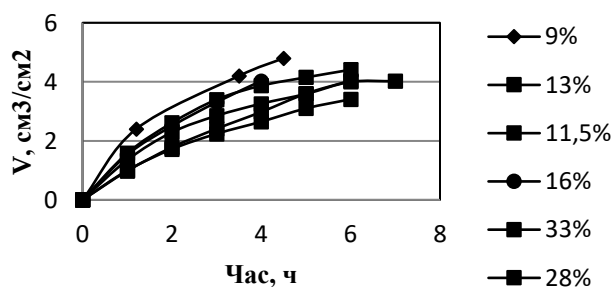


Рис.6 – Кінетика формування блоку льоду.

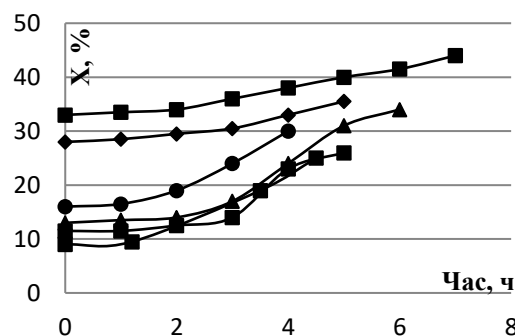


Рис. 7- Зміна концентрацій розчину.

Швидкість зміни концентрації соку залежить від його початкової концентрації та від об'єму залишку розчину у концентраторі (рис.7). Найбільша вихідна концентрація гранатового соку дорівнювала 47 °brix, що перевищує можливості відомих зразків кріоконцентраторів.

Кінетика сепарування. Наступний етап технології блокового виморожування – це процес сепарування, від якого залежить якість розділення розчину та втрати продукту із льодом. У всіх дослідях якісна картина процесу була подібна. На першому етапі концентрація стоків дорівнювала концентрації розчину (стікав поверхневий шар). На другому етапі вилучались стоки із об'єму блоку льоду, де температура була нижче, ніж на поверхні. Тому концентрація цих стоків на 5 – 8% перевищувала поверхневі стоки (рис.8). З часом, за рахунок плавлення льоду концентрація стоків зменшувалась (рис.8).

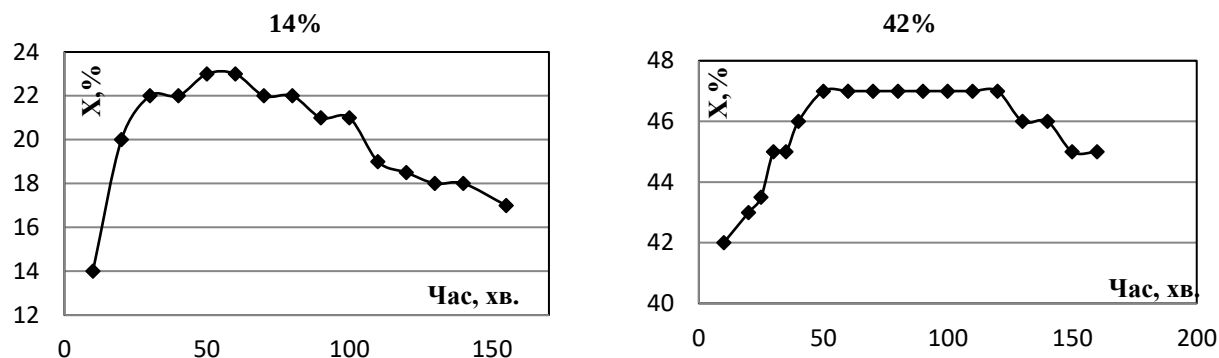


Рис. 8 – Кінетика сепарування гранатового соку при різних початкових концентраціях.

Температурним режимом сепарування можна регулювати залишкову концентрацію в блоці та тривалість процесу.

Висновки. Сумісне розв'язання балансових моделей процесів кристалізації та сепарування в апаратах блокового виморожування дозволяє визначати концентрації сухих речовин в блоці льоду при вимірюванні концентрації та об'ємів рідких фаз. Характер кріоскопічної лінії свідчить, що гранатовий сік є перспективним для концентрування методом виморожування. Дослідження кінетики його кріоконцентрування в апаратах блокового виморожування показали, що запропоновані технології дозволяють отримати концентрати гранатового соку до 50 °brix, а це суттєво перевищує відомі аналоги.

Економічна ефективність інноваційної технології визначається наступним. Енергетичні витрати на переведення води у тверду фазу в 7 разів менші, ніж у пару. Технологічні переваги в тому, що отримуємо висококонцентрований гранатовий сік з практично повним збереженням поживного потенціалу. Логістична привабливість в тому, що продукт займає менший об'єм, потребує менших витрат енергії при зберіганні та палива при транспортуванні.

Література

1. F. Khajehei, M. Niakousari, M. H. Eskandari, M. Sarshar. Production of Pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process // Journal of Food Process Engineering, 2015, Vol. 38, Issue 5, pp. 488-498.
2. A. Alogbi, U. Omar, M. Yousr, M. Grace, M. A. Lila, N. Howell. Antioxidant activity of pomegranate juice and punicalagin // Scientific Research Publishing. Natural Science, 2016, 8, pp. 235-246.
3. S. Chantasiriwan. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating // International Journal of Food Engineering 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 36-41.
4. Manal A. Sorour. Optimization of multiple effect evaporators designed for fruit juice concentrate // American Journal of Energy Engineering, 2015, pp. 6-11.
5. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК - Одесса: Полиграф 2009 - 288с.
6. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания Одесса: Полиграф, 2011 - 294с.

УДК 621.9.048; 664.002.5

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКТИВНОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНВЕЄРНИХ ВІБРАЦІЙНИХ СУШАРОК ПРИ ОБРОБЦІ СИПКОЇ СИРОВИНИ

Паламарчук Ігор Павлович, д.т.н, професор, завідувач кафедри харчових
технологій та мікробіології Вінницького національного аграрного університету

STATUS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL REALIZATION OF CONVEYOR VIBRATING DRYERS DURING PROCESSING OF BULK RAW MATERIALS

Palamarchuk Ihor Pavlovich, Dr. Sci., Professor, Head of the Department of Food
Technologies and Microbiology of Vinnytsia National Agrarian University

Анотація: На основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова проблема органічного поєднання транспортного та технологічного рухів при забезпеченні високої інтенсифікації та рівномірності тепломасообмінних процесів, що дозволило за необхідної якості обробки та продуктивності обладнання значно зменшити енерговитрати на металоємкість порівняно з традиційними віброконвеєрними машинами, що мають недеформований вантажонесучий орган; обґрунтовані основні режимні параметри при реалізації основної технологічної дії на сировину та вібраційного або хвильового транспортування продукції в умовах псевдозрідженого шару.

Summary: On the basis of theoretical and experimental researches, the scientific problem of the organic combination of transport and technological movements was solved with the provision of high intensification and uniformity of heat and mass transfer processes, which allowed for the required quality of processing and equipment efficiency to significantly reduce energy consumption of metal as compared to traditional vibroconveyor machines having a non-deformed load carrying body; Substantiated basic parameters in the implementation of the main technological effect on raw materials and vibration or wave transport of products in a fluidized bed.

Ключові слова: конвеєрна сушарка, незрівноваженість коливальної системи, вібропривод, сипка маса.

Key words: conveyor dryer, unbalance of oscillatory system, vibration drive, bulk mass.

Процес сушіння є одним із найпоширеніших в галузях переробних і харчових виробництв, реалізуючи ефективне руйнування сорбційного та осмотичного зв'язку вологи з матеріалом. Разом із тим, за механізмом здійснення та сутністю такі процеси є одними з найбільш складних. Тому засоби інтенсифікації сушильних процесів є актуальними та перспективними для впровадження.

Метою приведених досліджень є інтенсифікація процесів сушіння та підвищення їх продуктивності за рахунок вібромеханічної активації сипкого технологічного середовища, розробки віброконвеєрних систем для забезпечення поточної форми організації процесу.

Аналіз віброконвеєрних технологічних систем за особливостями конструкції вантажонесучого органу виявив три основні схеми: лоткову, барабанну та стрічкову. В якості предмету досліджень було обрано 2 схеми: двоконтейнерну барабанну та віброхвильову сушарки. За першої схеми процес транспортування сипкої продукції здійснювався за рахунок механічної зміни незрівноваженості коливальної системи (рис. 1). При цьому технологічно не складно у першому контейнері реалізувати теплову, а у другому – охолоджувальну дії, істотно збільшуючи рушійну силу процесу сушіння.

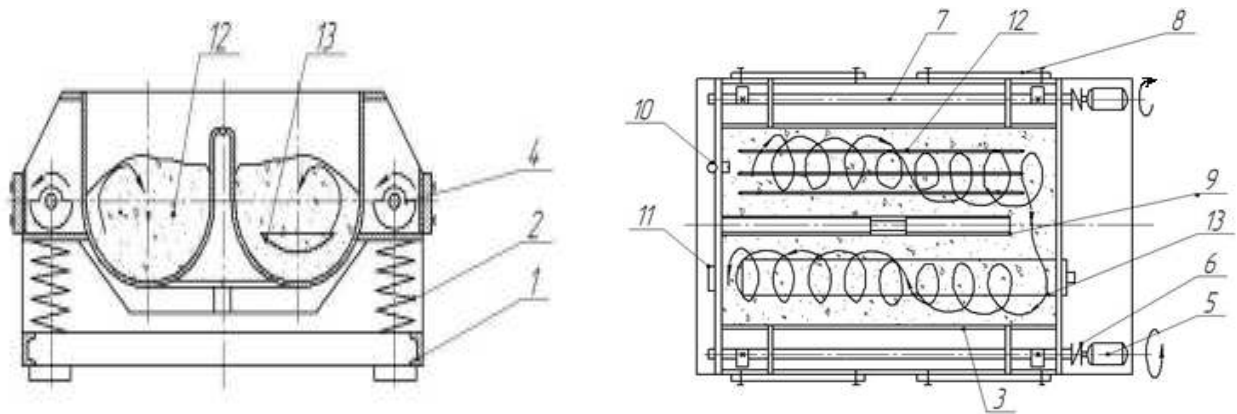


Рис. 1. Двоконтейнерна конвеєрна сушарка

1 - рама; 2 – пружина; 3 - корпус контейнера; 4 - дебаланси; 5 - електродвигун; 6 – пружна муфта; 7 - дебалансний вал; 8 - захисні щитки; 9 - роздільна перетинка; 10, 11 - завантажувальний та розвантажувальний патрубки; 12 - електротени; 13 - патрубок подачі повітря.

При розробці інфрачервоної віброхвильової сушарки компонування основних структурних складових машини здійснювалось на основі аналізу транспортно-технологічних машин з недеформувальним та гнучким транспортуємим органом за умови псевдозрідження продуктового потоку. В результаті була розроблена принципова схема віброхвильової інфрачервоної сушарки (рис. 2), особливостями якої є створення на робочій частині транспортерної стрічки 1 біжучої або стоячої хвилі в залежності від вибору режимних параметрів дебалансних вібробудувачів 11, 12, що агрегатовані в опорних котках 5, 6 стрічки. За такої схеми, на відміну від традиційно використовуваних віброконвеєрних сушарок, коливною масою машини є не вся опорна поверхня конвеєра, а лише котків, які підпружинені до корпуса, що значно зменшує енерговитрати на привод та металоємкість конструкції. Інфрачервоні випромінювачі 4 розміщені над поверхнею стрічки з можливістю вертикального регулювання подачі променистого потоку [1, 2, 4].

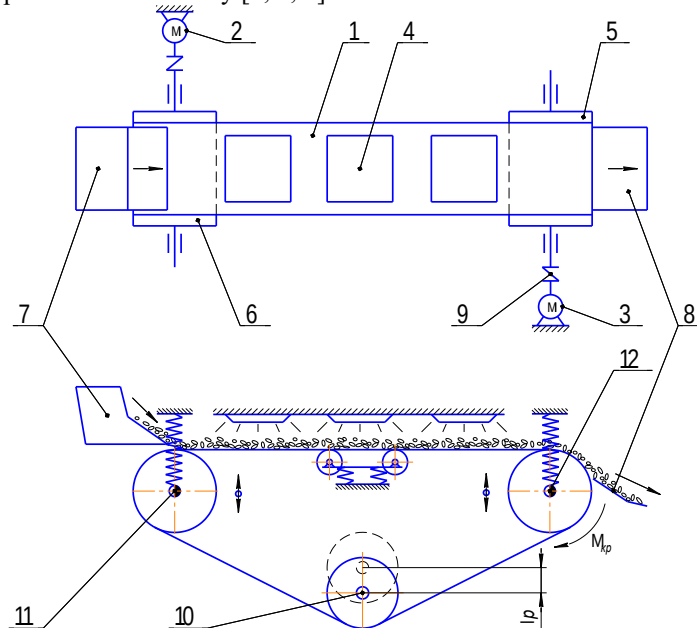
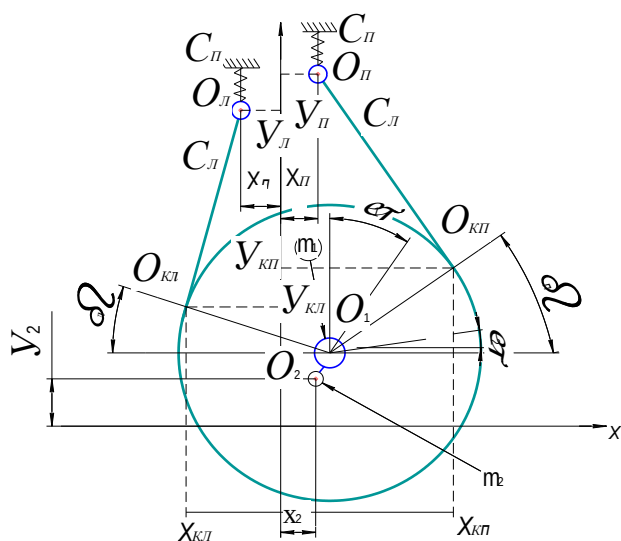


Рис. 2. Розроблена конвеєрна віброхвильова інфрачервона сушарка:

1 – стрічка; 2, 3 – двигуни вібробудувачів; 4 – інфрачервоні випромінювачі; 5, 6 – котки; 7 – живильник; 8 – приймальний бункер; 9 – пружна муфта; 10 – натяжний коток; 11, 12 – дебалансні вібробудувачі.

При математичному моделюванні процесів сушіння з представленими віброконвеєрними структурними елементами були використані наступні схеми: з деформувальним вантажонесучим органом (рис. 3) та з недеформувальним транспортуємим пристроєм (рис. 4).



Розподіл мас у системі:

$$m = m_1 + m_2$$

$$m_1 = m_{deb}$$

$$m_2 = m_g + m_n$$

Степені вільності системи:

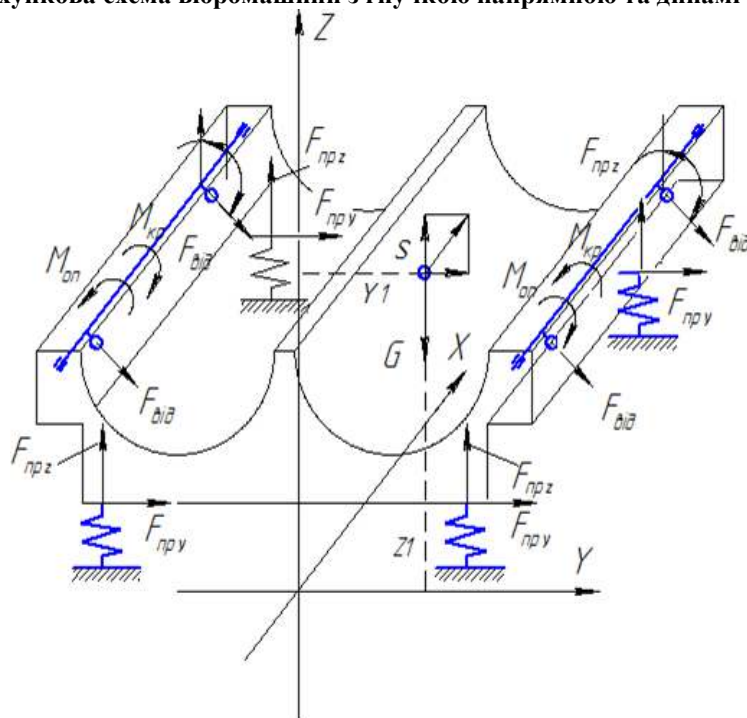
x_1 - горизонтальне переміщення приводного валу;

y_1 - вертикальне переміщення приводного валу ;

ϕ_1 - кутові зміщення приводного валу ;

ϕ_2 - кутові зміщення бічного диску опорного котка.

Рис. 3. Розрахункова схема вібромашини з гнучкою напрямною та динамічним приводом



Степені вільності системи:

z - зміщення центра мас контейнера вздовж осі x ;

y - зміщення центра мас контейнера вздовж осі z ;

ϕ_1 - кут повороту контейнера навколо осі y .

Рис. 4. Розрахункова схема вібромашини з недеформувальним транспортуючим пристроєм

Для даних розрахункових схем складаємо рівняння руху виконавчих органів відповідного обладнання при використанні методу Лагранжа та розв'язуємо їх чисельним методом [3, 5].

Для подальшого математичного аналізу використовуємо наукову гіпотезу про те, що силовий імпульс від робочих органів вібробудувача пропорційно передається та пошарово розподіляється у сипкому технологічному середовищі, а коефіцієнт дисипації або розсіювання енергії при цьому ототожнюємо з коефіцієнтом затухання коливань. Тому можна вважати справедливою інформацію, яку можна отримати при побудові та аналізі епюр сил та моментів, що забезпечують у коливній системі відповідну незрівноваженість.

Найбільш сприятливі умови для отримання потрібної траєкторії руху технологічного середовища спостерігається за наявності у досліджуваній коливальній системі комбінованої силової та моментної незрівноваженості, способи реалізації якої представлені на рис. 5 [6].

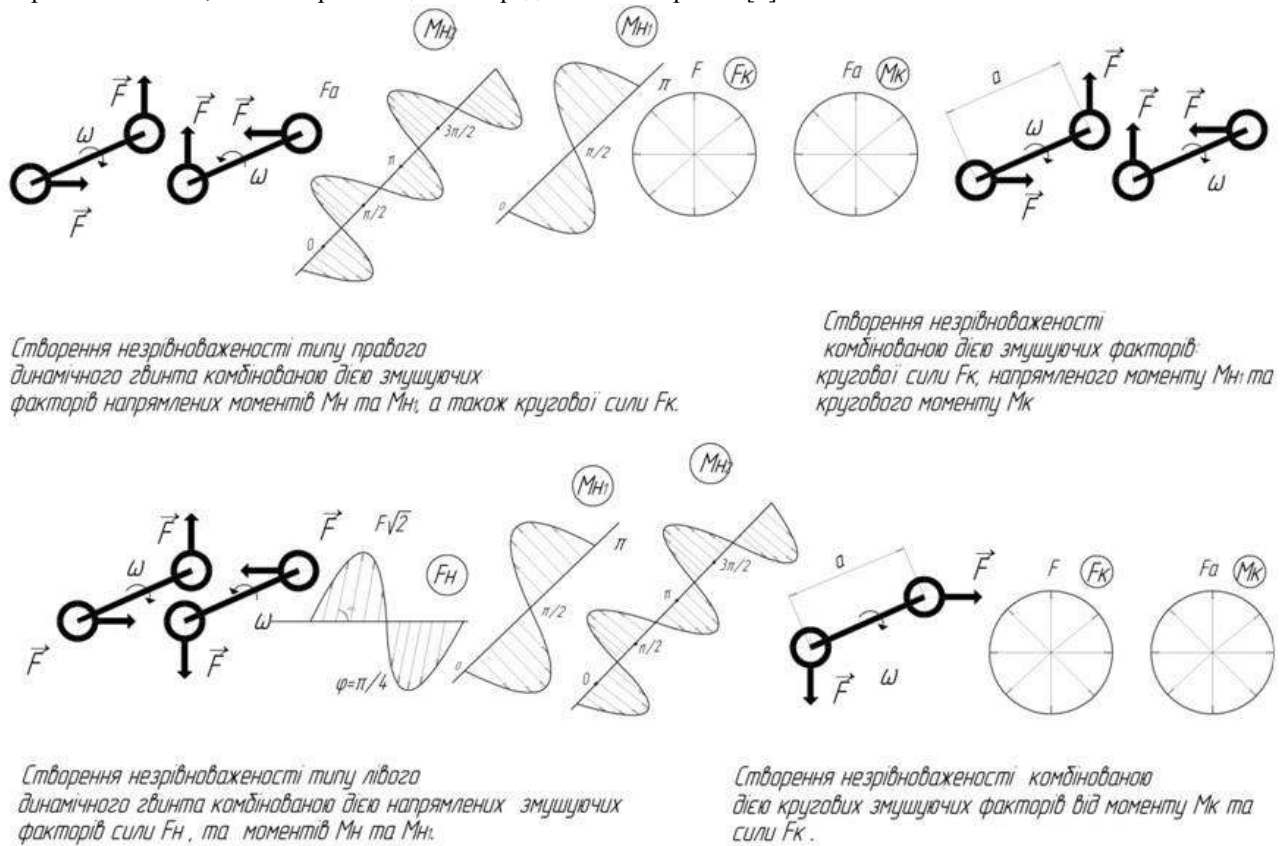


Рис. 5. Способи створення комбінованої незрівноваженості коливальної системи.

Висновки

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова проблема органічного поєднання транспортного та технологічного рухів при забезпеченні високої інтенсифікації та рівномірності інфрачервоного сушіння, що дозволило за необхідної якості обробки та продуктивності обладнання значно зменшити енерговитрати на металоємкість порівняно з традиційними віброконвеєрними машинами, що мають недеформований вантажонесучий орган; обґрунтовані основні режимні параметри при реалізації інфрачервоного сушіння сипкої продукції та хвильового транспортування продукції в умовах псевдозрідженого шару.

2. Розроблена технічна документація, виготовлена та впроваджена у виробництво експериментально-промислова модель віброхвильової інфрачервоної сушарки на базі ПП «Вінницький олійножировий комбінат».

3. Двоконтейнерна схема вібраційної сушарки з перехідним патрубком також дозволяє реалізувати поточний спосіб тепломасообмінної обробки при забезпеченні транспортного руху продукції за рахунок створення у системі комбінованої незрівноваженості.

Література

1. Друкований, М.Ф. Удосконалення теплотехнології при виробництві олії та біодизельного пального [Текст]: монографія / М.Ф. Друкований, В.М. Бандура, Л.М. Коляновська, В.І. Паламарчук // Вінниця, РВВ ВНАУ, 2014. – 254 с.
2. Паламарчук, І.П. Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвеєрної вібраційної сушарки [Текст] / І.П. Паламарчук, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Вібрації в техніці та технологіях. №2(66). Вінниця, 2012 - С.116-125.

3. Паламарчук, І.П. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми конвеєрної вібромашини для обробки продукції «насіпом» [Текст] / І.П. Паламарчук, В.І. Драчишин, В.І. Паламарчук // Збірник наукових праць ВНАУ, № 2(85), 2014. – С. 185 – 192.
4. Bandura, V. Description of heat exchange in the similarity theory of vibrating drying process of sunflower [Text] / V. Bandura, I. Zozuliak, V. Palamarchuk // Ukrainian Journal of Food Science, 2014. Vol. 2. Issue 2. 305-311.
5. Паламарчук, І.П. Анализ динамики виброконвейерной технологической системы с кинематическим комбинированным вибровозбуждением [Текст] / І.П. Паламарчук, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2013. Vol. 15. No.4. 314-323.
6. Паламарчук, І.П. Обґрунтування параметрів пружної системи віброконвеєрної машини з кінематичним комбінованим вібровозбудженням [Текст] / І.П. Паламарчук, В.І. Паламарчук, В.І. Драчишин // Східно-Європейський журнал передових технологій, № 6/7(66), 2013. – С. 25 – 30.
7. Пат. 87767 України. Вібраційна конвеєрна сушарка з інфрачервоними випромінювачами / І.П. Паламарчук, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук. – заявл. 28.02.2013; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. — 4 с.

УДК 532.528

МАСООБМІН ПРИ ЕКСТРАГУВАННІ КАВИ АКТИВОВАНИМ ЕКСТРАГЕНТОМ

**Вітенько Т.М., д-р техн. наук, професор, Городиський Н.І., аспірант
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя**

MASS TRANSFER DURING THE EXTRACTION OF COFFEE USING ACTIVATED EXTRACTANT

**Vitenko T. M., Doctor of Science, Professor
Horodyskyi N. I., post-graduate student
Ternopil Ivan Puluj National Technical University**

***Анотація** Проаналізовано цільові компоненти розчинної кави основні чинники що впливають на кінетику їх екстрагування із мелених зерен кави, зокрема температура, ступінь помелу, гідромодуль, тривалість. Розглянуто перспективні напрямки отримання екстрактів, що передбачають використання фізико-хімічного впливу як на екстрагент так і на систему в цілому. Експериментально досліджено масообмін при екстрагуванні в системі мелена кава-вода за умов використання активованого у кавітаційному пристрої гідродинамічного типу і неактивованого екстрагента за різних технологічних параметрів ведення процесу. Проаналізовано зміни які відбуваються в екстрагенті під впливом ефектів гідродинамічної кавітації. Запропоновано та обґрунтовано механізм інтенсифікації процесу вилучення цільових компонентів з обсмаженої меленої кави на основі аналізу можливого масообміну процесу. Експериментальні результати узагальнені на основі математичної моделі, що дозволяє визначати масообмінні коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього масообміну й дає змогу прогнозувати процес під час його реалізації на практиці. Проведено аналіз та порівняння масообмінних коефіцієнтів процесу. Обґрунтовано доцільність застосування запропонованого методу з використанням попередньої кавітаційної обробки екстрагента.*

Abstract: The objective components of instant coffee and the main factors influencing the kinetics of their extraction from ground coffee beans, in particular, temperature, degree of grinding, water duty, duration, are analyzed. The promising directions of extracts obtaining, which provide the use of physical-chemical influence both on the extractor and on the system as a whole are considered. The mass transfer during the extraction in the system "ground coffee-water" under conditions of activated in hydrodynamic type device and nonactivated extractant under various process parameters were experimentally studied. The changes that occur in the extractant under the influence of the effects of hydrodynamic cavitation are analyzed. The mechanism of intensification of the process of extracting the target components from roasted ground coffee based on the analysis of the possible mass transfer of the process is proposed and substantiated. Experimental results are generalized on the basis of a mathematical model that allows to determine mass exchange coefficients of external and internal mass transfer and allows to predict the process specific character during its implementation in practice. The analysis and comparison of mass transfer coefficients was carried out. The

expediency of application of the proposed method with the use of preliminary cavitation processing of extractant is substantiated.

Ключові слова: екстрагування, кавітаційна активація, коефіцієнти дифузії, розчинна кава

Keywords: extraction, cavitation activation, diffusion coefficients, instant coffee

Натуральна розчинна кава являє собою висушений до порошкоподібного стану екстракт меленої натуральної смаженої кави і призначений для швидкого приготування напою або використання в якості смакової добавки при виробництві різних харчових продуктів. Для його виробництва використовують каву натуральну 1-го і 2-го сортів. Дані досліджень показують, що найкращу за якістю продукцію дає сушка сублімації екстрактів, при якій в продукті в максимальному ступені зберігаються ароматичні і смакові властивості натуральної кави.

У розчинній каві містяться білки, вуглеводи, вільні жирні кислоти, в значних кількостях присутні хлорогенова кислота, дубильні речовини. Відносно змісту загальної кількості летючих ароматичних речовин розчинна кава практично не поступається обсмаженим і меленим. Найбільшими виробниками кави є Бразилія (40%) і Колумбія (15%), великими імпортерами – США і Західна Європа. В даний час кава виду Арабіка – безумовний світовий лідер серед всіх видів цього напою. На нього припадає близько 70% всіх кавових плантацій [1].

Як ми всі знаємо – кава це унікальна суміш смаку і аромату. Ці компоненти напою починають проявлятися як раз в момент екстракції ароматичних і смакових компонент, розчинених в суміші кавового порошку і води. Дуже важливо зрозуміти і правильно використовувати знання саме цього моменту. Фактично час екстракції є основоположним чинником для приготування напою, який Ви хочете отримати.

Отже – існує кілька основних параметрів екстракції. Зупинимося на кожному з них. 1. Відсоток цільових компонентів у екстракті. За загальноновизнаним правилом приготування якісного напою потрібно домогтися щоб близько 20 відсотків сухих розчинних речовин перейшли у екстракт. Звичайно ця цифра не є «непорушним правилом» – можна отримати і більше відсотків цільового компоненту у екстракті. Але необхідно слідкувати щоб поряд із цільовими компонентами не екстрагувались баласты. Зменшення відсотка вмісту екстракту дозволить отримати менш ароматний і менш насичений напій.

2. Температура для оптимального процесу екстракції повинна бути в межах 94 градусів. Можливі відхилення в 1-2 градуси. Цей режим є раціональним з точки зору вилучення компонентів і збереження аромату.

3. Ступінь помелу кавового зерна. Розрізняють декілька основних типів помелу кави. – Грубий помел, середній помел, тонкий помел. З точки зору екстрагування раціональним є середній помел. Оскільки крупний є не доцільний з точки зору екстрагування, а мілкий потребує складного розділення.

4. Тип зіткнення кавового порошку з водою в процесі екстракції. Не можна допускати нерівномірного розподілу кавового порошку в воді. Ці обидва компонента повинні бути добре перемішані.

5. Останній але не менш важливий параметр екстракція – це співвідношення ваги кавового порошку і обсягу використовуваної води.

Характерною особливістю екстрагування під час виробництва розчинної кави є його тривалість, що триває 7 – 8 год. Другою характерною особливістю є низький технологічний рівень їхнього оформлення. На превеликий жаль, на більшості підприємств процеси екстрагування ведуться в періодично діючих апаратах шляхом багатоступеневого протічнійного настоювання (перколяції), а то і простого настоювання (мацерації). Третьою особливістю даних процесів є низький ступінь вилучення цільових компонентів з рослинної сировини. Тому часто у відходи потрапляє значна кількість біологічно активних речовин.

Одним із перспективних напрямків отримання екстрактів є використання активації екстрагента [2-6]. Авторами отримано [2-5] новий екстрагент (електроактивовану водну систему) шляхом оброблення пом'якшеної питної води у електродіалізних мембранних установках. У роботі [6] запропоновано проводити електрохімічну активацію води. Отримані позитивні результати щодо підвищення ефективності екстрагування фенольних сполук з *Laonurus cardiaca* та валеріанової кислоти з *Valerianae officinalis* шляхом застосування екстрагента активованого у гідродинамічних кавітаційних пристроях [7,8]. Запропонований метод має переваги перед такими методами екстрагування як: вихрове [9], застосування роторно-пульсаційних апаратів [10, 11, 12]. Недоліками зазначених методів є суттєве подрібнення сировини і вимивання високомолекулярних речовин із зруйнованих клітин. Зазвичай отримують вилучення з баластами та значним вмістом дрібнодисперсної фази (мутні). Такі екстракти потребують відстоювання протягом декількох діб або центрифугування, а наявні баласты зменшують термін їхньої придатності і утруднюють очищення. Слід зазначити й досить великі енергетичні витрати

та ерозійне руйнування елементів пристроїв. Вони є ненадійними, що притаманно пристроям і апаратам, у яких використовують елементи, що обертаються з великою швидкістю і вимагають точного балансування.

Тому метою роботи було експериментальне обґрунтування у доцільності кавітаційної активації рідкої фази та попереднє дослідження масообміну в системі тверде тіло (подрібнена кава) – рідина (вода) неактивованим та активованим у гідродинамічному кавітаційному пристрої екстрагентом.

Методика експериментального дослідження полягала в наступному. Подрібнені зерна кави сорту робуста, фракцією в діапазоні $4,5 \cdot 10^{-3} \dots 5,5 \cdot 10^{-3}$ м масою 30г засипали в скляну ємність і заливали активованим екстрагентом масою 300г (гідромодуль 1:10). В якості екстрагенту було використано дистильовану воду. Екстрагент попередньо обробляли в кавітаційному пристрої статичного типу [8] впродовж 5 хв. Режим обробки екстрагенту було вибрано виходячи з теоретичних досліджень гідродинамічних параметрів в кавітаційному модулі статичного типу проведених з допомогою програми SolidWorks модуля Flow Simulation.

Після чого проводили інтенсивне перемішування зерен кави з екстрагентом за допомогою магнітної мішалки марки ММ-5 частота обертання 400-1200 об/хв. Екстрагування з зерен кави проводили за різних температурних умов 18°C, 40°C, 60°C.

На рисунках 1 та 2 наведено результати вилучення цільових компонентів з зерен кави за умови використання екстрагенту попередньо активованого в кавітаційному пристрої статичного типу та без активації. Дослідження проведено для різних значень гідромодуля та температури.

Проаналізувавши результати досліджень за умови активованого та неактивованого екстрагента можна зробити висновок, що за рахунок використання екстрагенту попередньо активованого в кавітаційному пристрої вдається отримати більший вихід сухих речовин з сировини у порівнянні з екстрагуванням за звичайних умов. З результатів експериментів, наведених на рисунках, за умов використання активованого екстрагенту спостерігається швидший перехід криволінійної ділянки у прямолінійну. Це засвідчує про швидше досягнення рівноважної концентрації в системі й зменшення тривалості процесу.

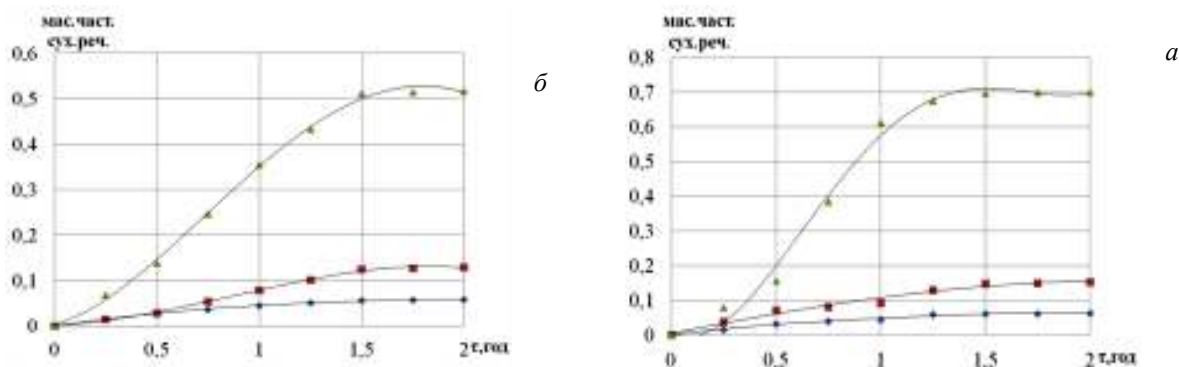


Рис. 1. Результати досліджень процесу екстрагування при гідромодулі 1:10 з а-неактивованим екстрагентом; б- з активованим екстрагентом

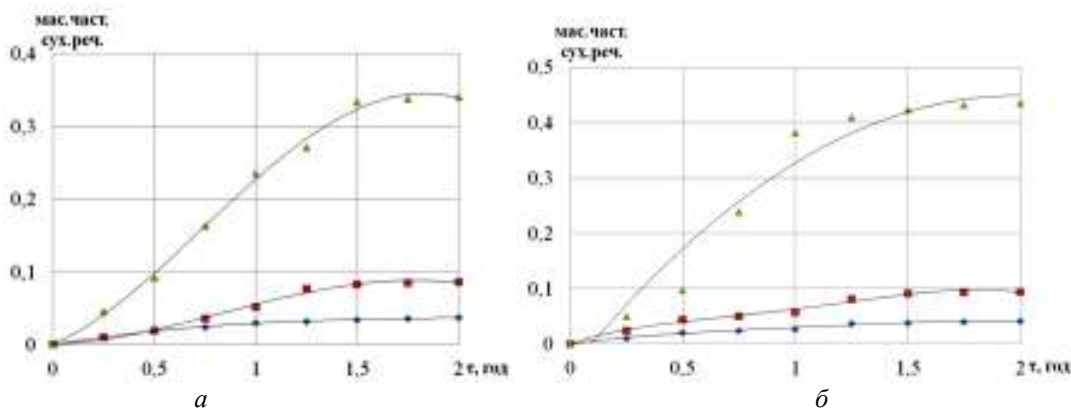


Рис. 2. Результати досліджень процесу екстрагування при гідромодулі 1:20 з а-неактивованим екстрагентом; б- з активованим екстрагентом

Такі результати пояснюються зміною властивостей екстрагента під час його кавітаційної обробки, що супроводжується зменшенням його в'язкості відносно початкової на 10%, поверхневого натягу, утворенням активних мономерних молекул (рис.3). Оскільки в'язкість обернено пропорційна коефіцієнту дифузії, то її зменшення сприятиме його зростанню й відповідно інтенсифікації внутрішнього масообміну. Зміна поверхневого натягу підтверджується результатами дослідів щодо вилучення валеріанової кислоти з капілярів різних розмірів обробленим і необробленим екстрагентом (рис.4). Активований екстрагент заповнює капіляр швидше (крива 1 знаходиться на кривій 2).

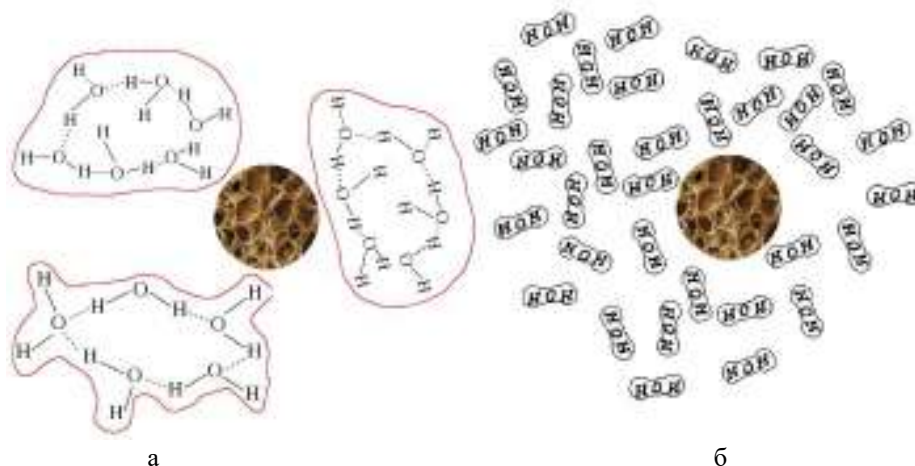


Рис.3. Зміна структури екстрагента внаслідок кавітаційної обробки:
а – до обробки; б – після обробки

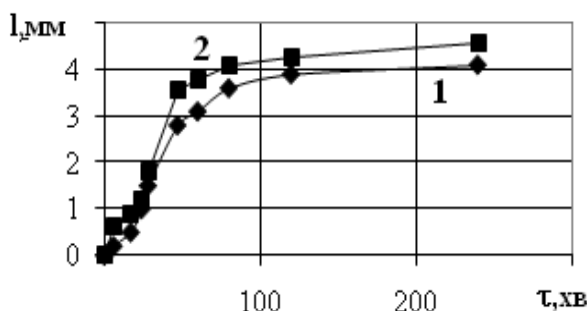


Рис. 4. Зміна межі розподілу суха – волога фази в капілярах розміром 0,5мм з часом:
1 – неактивований екстрагент; 2 – активований екстрагент

При математичній обробці отриманих експериментальних результатів було припущено, що найбільший опір переходу цільового компонента у основну масу екстрагента створює клітинна оболонка [13], а площа масообміну є рівною площі поверхні пор частинок рослинної сировини, а не площі зовнішньої поверхні і її можна визначити, як відношення площі зовнішньої поверхні частинки (F_0) твердої фази до порізності (ε).

Кількість цільової речовини, що екстрагується з твердої фази за проміжок часу t визначають за виразом:

$$-V \frac{dC}{dt} = k \frac{F_0}{\varepsilon} (C - C_1), \quad (1)$$

де k – коефіцієнт масопереносу; V – внутрішній об'єм клітини; C – плінна концентрація цільового компонента у клітинах твердої фази, C_1 – концентрація цільового компонента у екстрагенті.

Друге рівняння отримано з рівняння матеріального балансу:

$$W(C_1 - C_n) = V(C_0 - C), \quad (2)$$

де W – об'єм екстрагента; C_n – початкова концентрація екстрагента ($C_n = 0$); C_0 – початкова концентрація цільового компонента у клітинах твердої фази.

Рішенням системи рівнянь 1 і 2, з урахуванням умов рівноваги $C = C_1 = C_{lp}$ є вираз:

$$1 - \frac{C_1}{C_{1p}} = \exp\left(\frac{kF_0(1+\beta)}{V\varepsilon}\right)t, \quad (3)$$

де C_{1p} – рівноважна концентрація цільового компонента у екстрагенті; $\beta = \frac{V}{W}$.

Рівняння (3) у логарифмічних координатах описує пряму лінію, за тангенсом кута нахилу якої можна визначити коефіцієнт масопереносу k . Отже одержані експериментально значення концентрацій цільового компонента у екстрагенті і рівноважних концентрацій підставляли у рівняння:

$$\lg\left(1 - \frac{C_1}{C_{1h}}\right) = -k^*t, \quad \text{де } k^* = \frac{0.434kF_0(1+\beta)}{V\varepsilon} \quad (4)$$

Результати обчислень для процесів екстрагування у звичайних умовах та з використанням активованого екстрагента для частинок з розмірами $4,5 \cdot 10^{-3}$ - $5,5 \cdot 10^{-3}$ м зображено на рис. 5, 6.

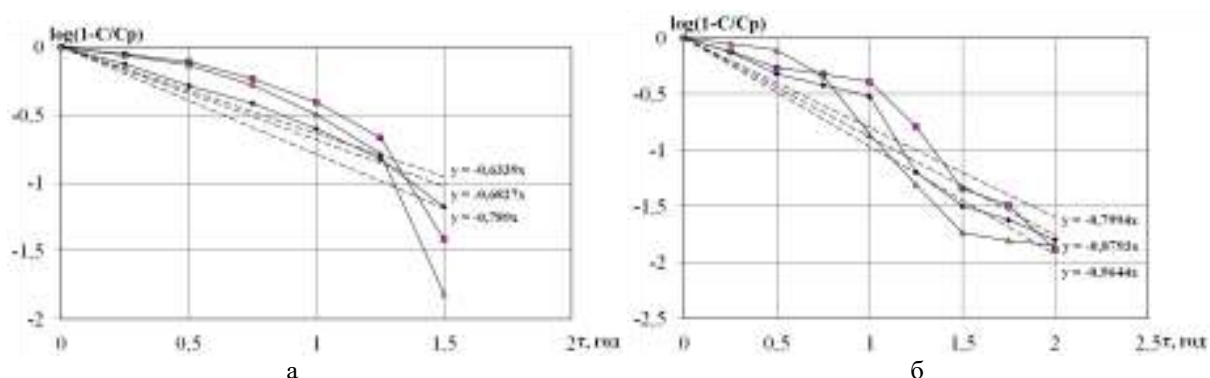


Рис. 5 Лінії регулярного режиму процесу екстрагування при гідромодулі 1:10 з а- неактивованим екстрагентом; б- з активованим екстрагентом

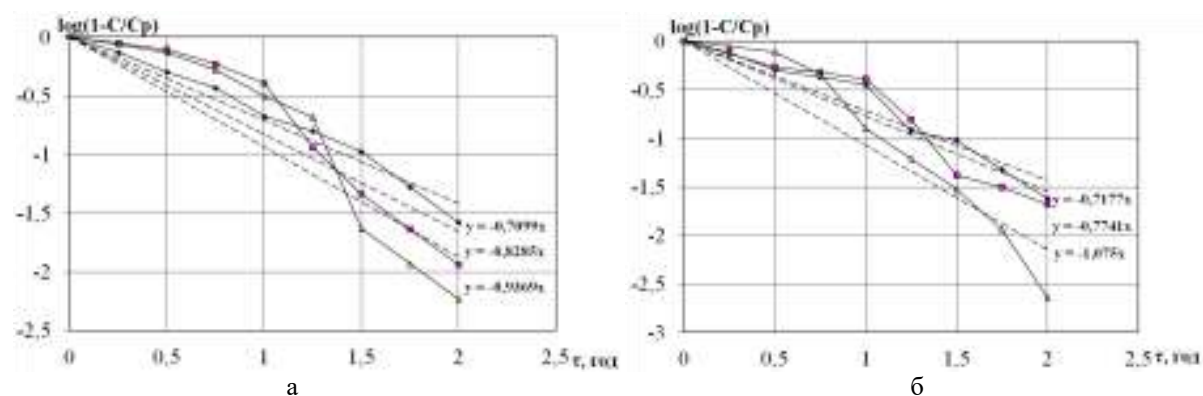


Рис. 6 Лінії регулярного режиму процесу екстрагування при гідромодулі 1:20 з а- неактивованим екстрагентом; б- з активованим екстрагентом

Подальшу обробку отриманих результатів виконували приймаючи до уваги, що порізність – це відношення об'єму пустот у частинці твердої фази до її повного об'єму $\varepsilon = \frac{U}{U_0}$, а β у рівнянні (4) з врахуванням умов рівноваги визначали, як: $\beta = \frac{C_{1p}}{C_0 - C_{1p}}$.

Оскільки частинки твердої фази мають малий розмір, то можна припустити, що вони мають кулясту форму. Тоді для однієї частинки справедливим є відношення

$$\frac{F_0}{\varepsilon_{II}} = \frac{5,33\pi^2 \cdot R_{cp}^5}{U_0} \quad (5)$$

А для всієї маси сировини, що підлягає екстрагуванню, можна записати рівняння

$$\frac{F_0}{\varepsilon_{II}} = \frac{5,33\pi^2 \cdot R_{cp}^5 \cdot G}{U_0 \cdot g}, \quad (6)$$

де G – маса твердої фази завантаженої на екстрагування, кг; g – маса однієї частинки, кг; R_{cp} – середній радіус частинки твердої фази.

Тоді рівняння для визначення коефіцієнта масопереносу k матиме вигляд

$$k = \frac{k^* \cdot W \cdot U_0 \cdot g \cdot \beta}{22,8 R_{cp}^5 \cdot G \cdot (1 + \beta)} \quad (7)$$

Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Таблиця 1 Значення коефіцієнтів масовіддачі активованого екстрагента

Гідромодуль 1:10	Неактивований	k^*	k
	18°C	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-9}$
	40°C	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$
	60°C	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
	Активований	k^*	k
	18°C	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$4,94 \cdot 10^{-9}$
	40°C	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$
Гідромодуль 1:20	60°C	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$
	Неактивований	k^*	k
	18°C	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$6,68 \cdot 10^{-9}$
	40°C	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$6,22 \cdot 10^{-9}$
	60°C	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,28 \cdot 10^{-9}$
	Активований	k^*	k
	18°C	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$5,92 \cdot 10^{-9}$
	40°C	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$
	60°C	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$9,22 \cdot 10^{-8}$

Отримані результати в цілому підтверджують доцільність застосування активованого екстрагента для збільшення вилучення цінних компонентів з подрібнених зерен кави. Водночас слід зазначити що для використання на виробництві запропонованого методу та опису механізму інтенсифікації масообміну необхідно провести серію додаткових досліджень у широкому діапазоні технологічних параметрів, що відповідають технічним умовам.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження масообміну екстрагування із мелених зерен кави з використанням активованого екстрагента дали змогу визначити коефіцієнти масопереносу за різних режимів кавітаційної активації. Результати порівняння ефективності екстрагування активованим у гідродинамічному кавітаційному пристрої екстрагентом засвідчили збільшення вилучення цільових компонентів та інтенсифікацію процесу порівняно з екстрагуванням за базових умов.

Література:

1. Блинникова О. М. Товароведение и экспертиза вкусовых товаров. : учебное пособие. – Мичуринск : МичГАУ – 2007. – 234 с.
2. Гулый И.С., Бобровник Л.Д., Купчик М.П. и др.. Электромембранная обработка водных сред т ее применение в производстве пектина. – Пищевая промышленность. – 1993. - №11. – 19-20 с.
3. Донченко Л.В. , Карпович Н.С., Симхович Е.Г.; Производство пектина – Кишинев: – 1993. – 182с.
4. Нелина В.В. , Донченко Л.В., Карпович Н.С. Экотехнология пектина и пектинопродуктов из вторичных сырьевых ресурсов. – Хранение и переработка сельхозсырья. – 1994.- №3. – 15-16с.
5. Купчик М., Чук В, Купчик Л, Картель М. Комплексоутворююча здатність пектинопродуктів одержаних з використанням електрохімії. – Харчова і переробна промисловість. – 2003. - №6. – .20 – 21с.
6. Купчик М.П., Чук В.В., Богданов Є.С. Виробництво пектинопродуктів з використанням електротехнології підготовки гідролізуючого агента. – Харчова промисловість. – Додаток до журналу

№3. – Опубліковано за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції Розроблення та виробництво продуктів функціонального харчування, інноваційні технології та конструювання обладнання для перероблення сільгоспсировини, культура харчування населення України – Київ НУХТ.- 2003.- 20-21с.

7. Вітенько Т.М. Дифузійні константи процесу екстрагування валеріани при попередній кавітаційній обробці. – Днепропетровск: «Вопросы химии и химической технологии» – 2007, – №3, 147–150с.

8. Вітенько Т.М. Інтенсифікація масообміну в системі капілярно-пористе тіло – рідина. – Днепропетровск: «Вопросы химии и химической технологии» – 2006, – №3, 153-156 с.

9. Melichar M., Rusek V., Solich Y., Ceskosl. Farmac., 3(10), 336-341 (1954)

10. Леквишвили М. В., Балабудкин М.А. и др. Хим.-фарм. журн. – 17(3), 354-356 (1983).

11. Соснина Н.А., Миронов В.Ф., Коновалов А.И. и др. Экстрагирование пектиновых веществ амаранта в суперкавитирующем аппарате роторно-пульсационного типа. – Хранение и переработка сельхозсырья. – 1999. - №6.- 32-35с.

12. Запорожец Е.П., Богус А.М., Яхутль М.Ю. Экстрагирование пектина из растительного сырья механическим способом в кавитационном аппарате. – Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1998. - №1.- 84-85с.

13. Дячок В.В. Математична модель процесу екстрагування із рослинної сировини. – Хімічна промисловість України – 2001. – №4. – 52-55 с.

УДК 66.063.94:045

БАЛАНСОВІ МОДЕЛІ ТА ФАЗОВІ РІВНОВАГИ ПРИ КРІОКОНЦЕНТРУВАННІ ГРАНАТОВОГО СОКУ

Бурдо А.К.¹, Давар Ростами Пур²,

Стоянова О. М.¹, Драгні О. І.¹

¹ ОНАХТ, м. Одеса, Україна ² DRP Group, Тегеран, Іран

BALANCE MODELS AND PHASE EQUILIBRIUMS AT CRYOCONCENTRATION OF POMEGRANATE JUICE

Burdo A.K.¹, Davar Rostami Pur²,

Stoyanova A. M.¹, Dragani O. I.¹

¹ONATH

² DRP Group, Tehran, Iran

Анотація. Робота присвячена дослідженню статичних моделей апаратів блокового виморожування. Дана методика розрахунку балансових моделей процесів кристалізації та сепарування блоку льоду. Наведена методика експериментального дослідження умов фазової рівноваги при кріоконцентруванні гранатового соку. В результаті отримано кріоскопічну лінію для гранатового соку в діапазоні концентрацій сухих речовин 3 – 50%.

Abstract. The work is devoted to the research of static models of block freezing devices. This methodology for calculating the balance models of crystallization processes and separation of the ice block is given. The method of experimental study of the conditions of the phase equilibrium in the cryoconcentration of pomegranate juice is given. As a result, a cryoscopic line for pomegranate juice was obtained in the range of concentrations of dry matter of 3 - 50%.

Ключові слова: кріоконцентрування, балансові моделі, блокове виморожування, кріоскопічна лінія, гранатовий сік.

Key words: cryoconcentration, balance models, block freezing, cryoscopic line, pomegranate juice.

Вступ. На ринках харчових продуктів зростає попит на різноманітні соки. Крім соків прямого віджимання збільшується сектор відновлювальних соків. Такі соки виготовляють із концентрованих шляхом додавання до них питної води. Виробників концентрований сік приваблює тим, що він довго зберігає свій харчовий потенціал, потребує менших об'ємів при зберіганні та зменшує витрати при транспортуванні.

Аналіз літературних джерел та формулювання мети досліджень. Свіжовичавлений сік граната є одним з найцінніших продуктів харчування, а його біологічна активність набагато вище, ніж у багатьох інших плодових і ягідних соків. В його складі багато органічних кислот, і найбільше лимонної - тому гранатовий сік має такий виражений, характерний смак; є амінокислоти, замінні і незамінні, водорозчинні поліфеноли і вітаміни, з яких найбільше аскорбінової кислоти і вітамінів групи В, потім А, Е, РР; є також фолацин - природна форма фолієвої кислоти. Крім того, є і мікроелементи: фосфор, кальцій, магній, калій, залізо, натрій; дубильні і пектинові речовини. Калію в гранатовому соку більше, ніж в будь-якому іншому фруктовому соку [1].

Гранатовий сік засвоюється дуже легко, і в ньому зберігаються всі корисні речовини, присутні в цілому гранаті. Смак у гранатового соку теж незвичайний, злегка терпкий, але освіжаючий і приємний. Поліфеноли, що містяться в свіжовичавленому соку граната, мають виражену антиоксидантну активність [2]. Коли мова заходить про захист від вільних радикалів, то зазвичай згадують червоне виноградне вино, зелений чай, журавлину і лохину, але, виявляється, гранатовий сік в цьому відношенні більш активний.

Концентрат - це згущена форма фруктового соку, отримана методом випаровування або заморозки [3]. Далі методом відновлення з концентрату отримують фруктовий сік, який не втрачає своїх корисних якостей і зберігає в своєму складі вітаміни. Але, для цього необхідно удосконалювати технології концентрування соків [4].

Таблиця 1. Амінокислотний склад граната [5]

Амінокислоти	Періодичне - до кристалізації				Після 4-місячного зберігання при температурі 0-2 °С							
	Традиційний сорт Білий Морскаль		Новий сорт Білий Глобальний		При стандартній дієтній вмістності (СДВ) - контроль				Після ультрафільтрації та заморожування (МЛС) - випар			
	Білий Морскаль		Білий Глобальний		Білий Морскаль		Білий Глобальний		Білий Морскаль		Білий Глобальний	
	Сок	Концентрат	Сок	Концентрат	Сок	Концентрат	Сок	Концентрат	Сок	Концентрат	Сок	Концентрат
Цистин-цистин	296	3780	268	3948	176	2430	183	2756	329	3380	212	3496
Лейцин	138	1410	144	1490	68	448	57	536	112	996	110	1083
Гістоцилін	208	2971	287	2654	204	2721	178	2703	312	3213	298	3092
Аргінін	452	2021	462	2085	Середнє	364	52	484	96	687	109	714
Аспартинова кислота	526	6222	515	6106	507	2236	490	2182	566	2682	548	2383
Серин	403	3171	412	3243	216	2840	238	2903	469	4251	482	4193
Гліцин	644	4062	628	4114	592	3672	577	4724	658	4760	644	4348
Глютамінна кислота	503	5381	522	5352	560	2031	583	2408	684	2498	702	2836
Треонін	307	3831	411	3863	78	1896	217	1944	193	2786	280	2804
Аланин	452	3921	347	3834	198	1370	188	1356	328	5100	325	5052
Тирозин	342	809	360	1101	81	228	106	331	176	385	204	373
Метіонін	-	2511	-	2572	-	209	-	342	-	687	-	699
Ізолейцин	613	1140	608	1258	114	881	112	929	408	1820	400	1938
Фенілаланін	456	7234	474	7102	504	7832	482	7710	570	8672	578	8644
Лізолейцин	647	6983	622	6822	531	6273	284	6330	378	6442	361	6394
Сума амінокислот	6641	94615	6680	58161	3629	34421	3757	37729	5179	48462	5173	42237
Незамінні амінокислоти	2913	2754	3008	27259	1294	20624	1392	20978	2069	25303	2136	24749
Незамінні як суми АК, %	48,22	50,42	48,63	48,42	35,80	58,22	37,03	55,60	39,95	52,21	41,30	58,60
Потери сумарного вмісту АК, %					39,33	35,14	38,00	31,60	14,27	11,27	14,64	23,43
Потери незамінних АК, %					55,4	25,11	53,72	23,04	28,97	8,12	28,99	4,21

Метою роботи було отримання статичних моделей і фазової рівноваги при виробництві висококонцентрованого гранатового соку за технологією блокового виморожування. Робота проводилась в лабораторіях кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту.

Результати досліджень

Першим етапом роботи є визначення статичних моделей процесу криоконцентрування соку, до яких відносяться балансові моделі та термодинамічні моделі фазової рівноваги в системі «розчин - лід» [6]. Для апаратів блокового виморожування [7] балансові моделі мають визначати співвідношення матеріальних балансів процесів кристалізації та сепарування та рівняння теплового балансу.

Розглянемо балансові моделі процесу блокового виморожування. На вхід до кристалізатора подається сік з початковою концентрацією X_n та масовим розходом G_n (рис.1).

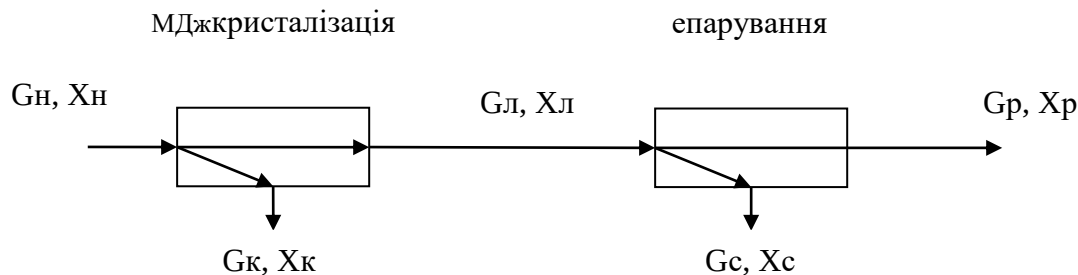


Рис.1 – Схема матеріальних потоків

Із концентрату виходить розчин з концентрацією X_k та масовим розходом G_k та лід, витрати якого G_l . В порах льоду є розчин, концентрація якого X_l . Після сепарування відділяються стоки, із розходом G_c та концентрацією X_c . Розплав льоду має параметри: G_p , X_p . На практиці легко вимірюються параметри: G_n , X_n , G_k , X_k , G_c , X_c . Інші параметри визначаються із системи рівнянь.

Для процесу кристалізації:

$$\left. \begin{aligned} G_k + G_l &= G_n \\ G_k X_k + G_l X_l &= G_n X_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Із першого рівняння в (1) знаходиться G_l , яке підставляється у друге рівняння системи (1). Після спрощень визначається вміст сухих речовин в блоці льоду:

$$X_l = \frac{G_n X_n - G_k X_k}{G_n - G_k} \quad (2)$$

Для процесу сепарування:

$$\left. \begin{aligned} G_c + G_p &= G_l \\ G_c X_c + G_p X_p &= G_l X_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Значення G_l й X_l отримано із розрахунків кристалізатора. Аналогічно (2) визначаються втрати концентрату із розплавом льоду:

$$X_p = \frac{G_l X_l - G_c X_c}{G_l - G_c} \quad (4)$$

Концентрація сухих речовин гранатового соку вимірювалась за допомогою TDS метра. Принцип дії TDS-метра (total dissolved solids) досить простий і заснований на прямій залежності електропровідності розчину (сили струму між електродами приладу) від кількості розчинених у воді сполук. TDS-метр показує результат на екрані рідкокристалічного дисплея в одиницях виміру mS.

Тарировка TDS-метра проводилась за традиційною методикою шляхом висушування розчину в сушильній камері до постійної ваги. Для зважування бюкс та визначення концентрації за допомогою сушіння використовувались ваги RADWAG AS 220 / C, які мають дискретність - 0,0001 г.

Графік залежності показань TDS-метра і показань отриманих експериментальним шляхом – сушінням до постійної ваги – наведено на рис.2.

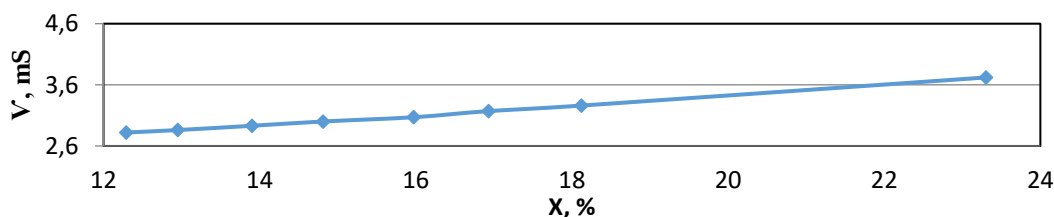


Рис.2. Графік залежності показань TDS-метра від концентрації гранатового соку

Умови термодинамічної рівноваги системи «гранатовий сік - лід» мають визначатися по значенням криоскопічних температур. В доступних літературних джерелах такі залежності не знайдено, тому проведено експериментальні дослідження.

Відомо, що процес утворення твердої фази характеризується ізотермічністю для розчинів з низькою концентрацією наведених компонентів або стрибком температури в об'ємі для насичених розчинів [5]. Фіксація цього стрибка і передбачається в стенді для визначення криоскопічних температур (рис.3).

Основним елементом стенду є кріостат. Це металевий блок з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності і сумісного з досліджуванним продуктом. У блоці висвердлюється відкрита гільза, в яку заливають продукт.

По центру гільзи розташовується датчик, який центрується спеціальної фіксувальною шайбою, яка виготовлена з тонкого нетеплопровідного матеріалу. Датчик заводиться в герметичний металевий капіляр і підключається до планшета або комп'ютера, де попередньо встановлена програма для фіксування даних.

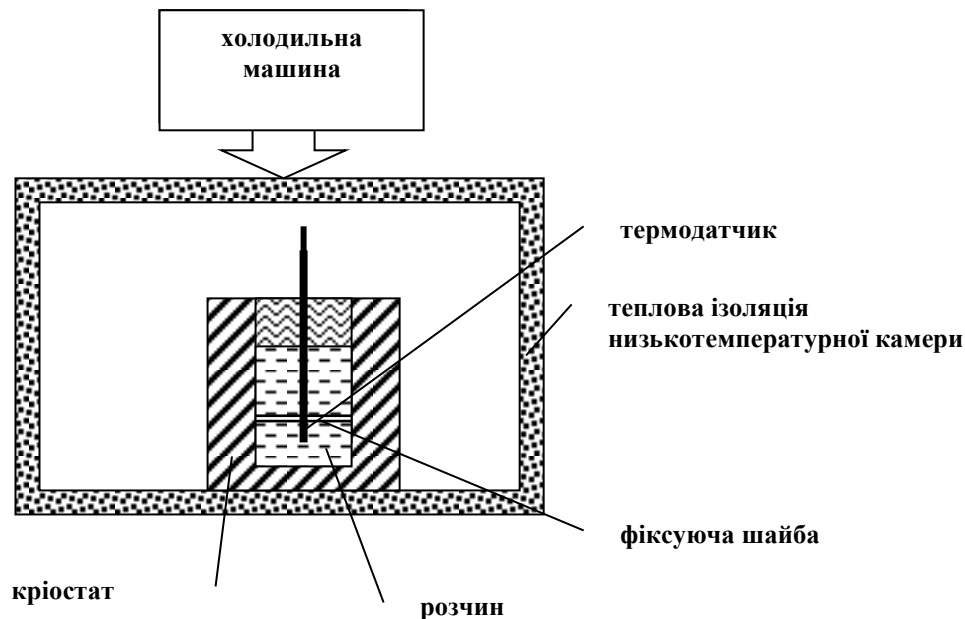


Рис.3. Схема стенду для визначення кріоскопічних температур

Методика експериментальних досліджень заснована на процесі регулярного відведення енергії від деякого об'єму рідини. Послідовно реєструються температури рідкої фази, встановлюється найменша температура гідратної фази, фіксується скачок температури, рівень температур, при якому відбувається фазовий перехід, і температурний режим переохолодження твердої фази. Якісний вид експериментальної кривої наведено на (рис.4.).

Важливо при проведенні дослідів встановити мінімальну температуру гідратного стану (точка 2), після якої чітко виміряти температури процесу 3 - 4. Саме при цих температурах і відбувається утворення твердої фази. Рівень цих температур, тривалість процесу 3 - 4 залежать від концентрації розчину. Отже, експериментальний стенд повинен забезпечити організації цих процесів і коректне вимірювання температури.

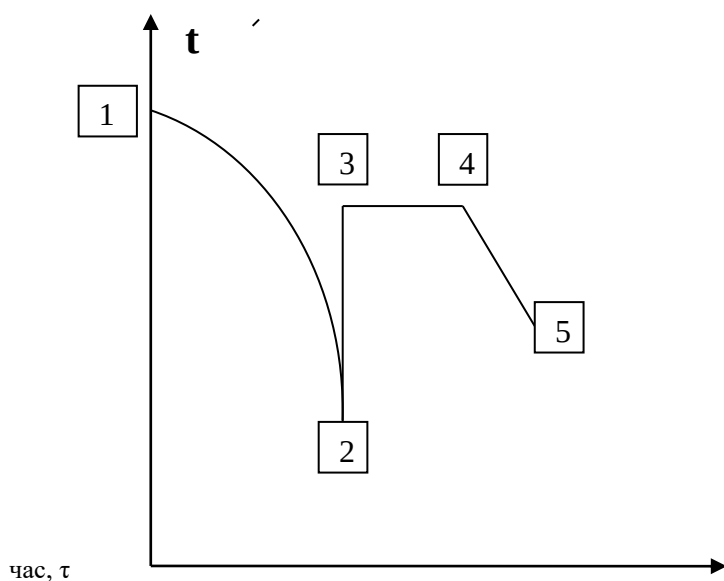


Рис.4. Типова крива кріоскопічного дослідів

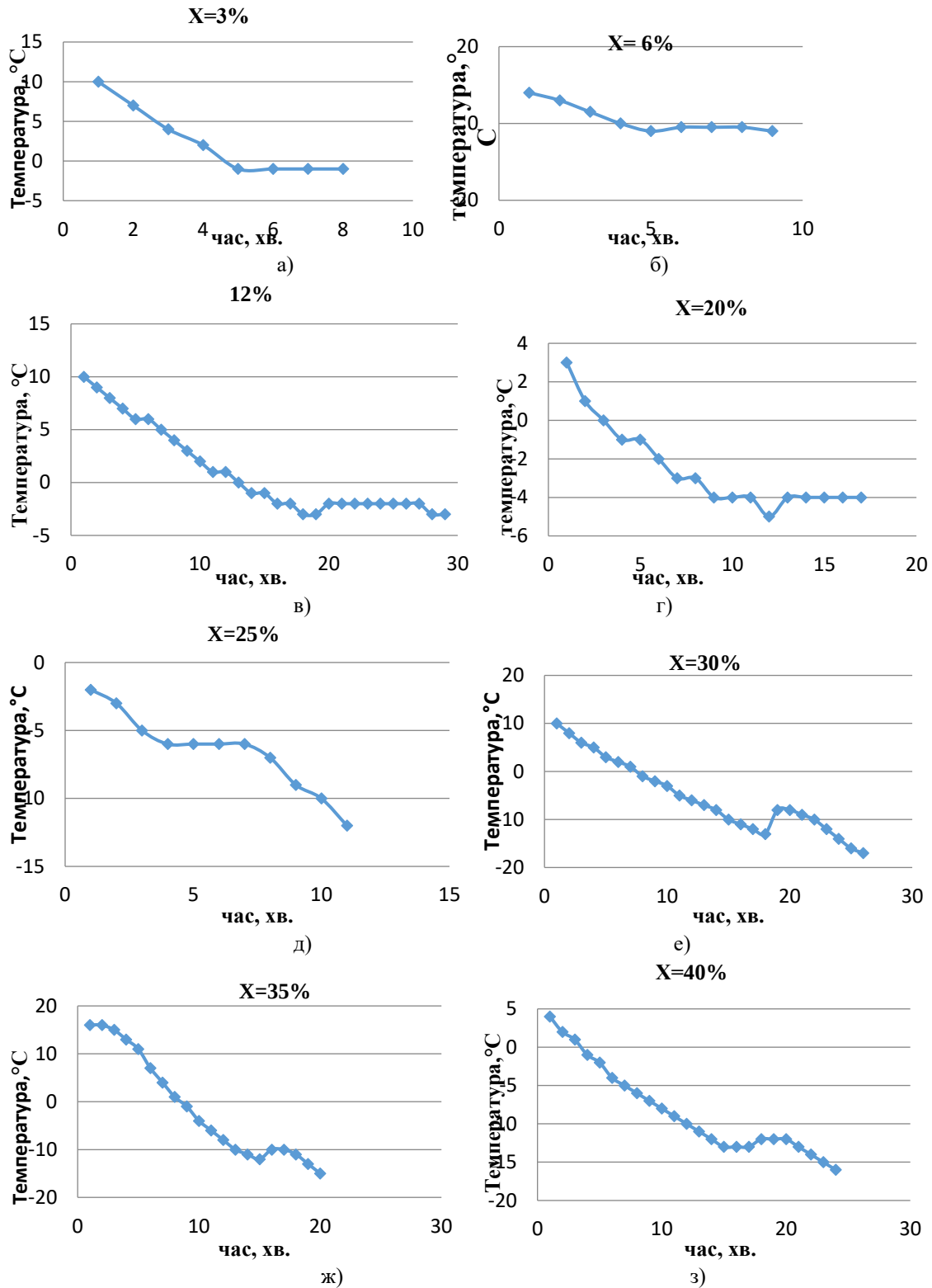


Рис. 5 – Кріоскопічні залежності гранатового соку

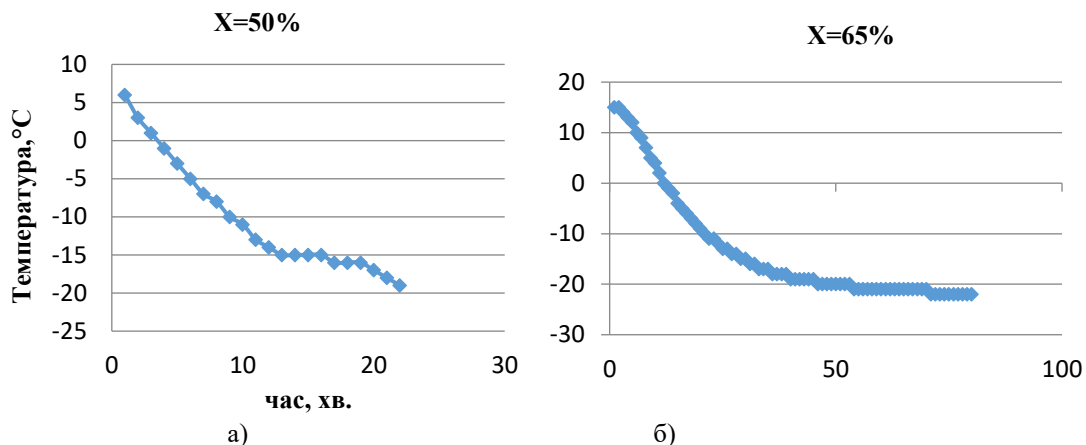


Рис. 6 – Кріоскопічні залежності висококонцентрованого гранатового соку

Осередок кріостату виготовлено з теплопровідного металу, він має форму циліндра із стінками завтовшки 40мм. Така конструкція сприяє згладжуванню флуктуацій температур всередині об'єму рідини. Для проведення дослідження фазової рівноваги готувалися розчини гранатового соку з певною масовою концентрацією. У робочу зону осередку відбирали пробу розчину в кількості 2 см³ і розміщували в ній датчик так, щоб він знаходився в середині об'єму рідини (рис.3). Точність вимірювання кріоскопічних температур була не нижче 0,1 °C. Надійна теплова ізоляція камери, де розташовано кріостат, забезпечує рівень температур в осередку до мінус 25 °C.

Методика експериментальних досліджень, заснована на процесі регулярного відведення енергії від продукту. Програма кріоскопічних досліджень включала визначення значень кріоскопічних температур для концентрацій гранатового соку $X = (3; 6; 12; 16; 20; 25; 30; 35; 38; 40; 45; 50; 65)\%$.

За результатами дослідів експериментальних досліджень побудовані графічні залежності впливу концентрації на характер процесів охолодження розчинів, утворення льоду і його переохолодження. Лінія постійної температури і відповідала значенням кріоскопічної температури. Деякі графічні залежності наведені на (рис. 5, 6).

Для розчину з концентрацією $X = 65\%$ кріоскопічну температуру визначити складно (рис.7, 6).

Середні значення температур процесів льодоутворення використані для побудови узагальненої залежності цих температур від концентрації розчину. Сукупність цих точок і становить кріоскопічні криву (рис.7).

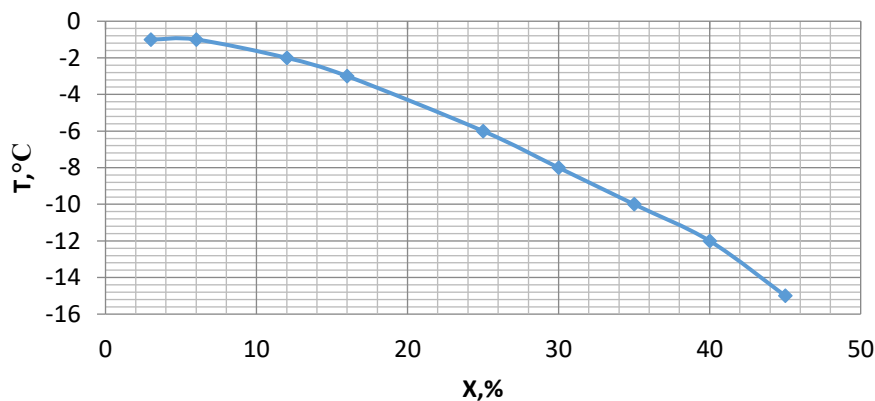


Рис.7 – Кріоскопічна крива гранатового соку

Отримана залежність необхідна для визначення рушійної сили процесу кристалізації при виморожуванні гранатового соку і для розрахунку коефіцієнтів масопереносу.

Висновки. Сумісне розв'язання балансових моделей процесів кристалізації та сепарування в апаратах блокового виморожування дозволяє визначати концентрації сухих речовин в блоці льоду при вимірюванні концентрації та об'ємів рідких фаз. Характер кріоскопічної лінії свідчить, що гранатовий сік є перспективним для концентрування методом виморожування і доцільно проводити подальші дослідження кінетики його кріоконцентрування.

Література

1. F. Khajehei, M. Niakousari, M. H. Eskandari, M. Sarshar. Production of Pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process // Journal of Food Process Engineering, 2015, Vol. 38, Issue 5, pp. 488-498.
2. A. Aloqbi, U. Omar, M. Yousr, M. Grace, M. A. Lila, N. Howell. Antioxidant activity of pomegranate juice and punicalagin // Scientific Research Publishing. Natural Science, 2016, 8, pp. 235-246.
3. S. Chantasiriwan. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating // International Journal of Food Engineering 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 36-41.
4. Manal A. Sorour. Optimization of multiple effect evaporators designed for fruit juice concentrate // American Journal of Energy Engineering, 2015, pp. 6-11.
5. Самсонова А.Н., Ушева В.Б. Фруктовые и овощные соки – М. Агропромиздат. – 1990. – 287с.
6. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф. – 2009. – 288с.
7. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф. – 2011. – 294с.

УДК [637.63:66-913.2]:637.022

МАШИНА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПЕРА ПТИЦЫ

Всеволодов А.Н., к.т.н., доцент; Романов С.О. бакалавр ф-т ЕТОтаТД
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

MACHINE FOR PRELIMINARY DEHYDRATION BIRD FEATHER

Vsevolodov A.N., candidate of technical sciences, associate professor; Romanov S.O.
Bachelor of Science f-t ETEandTD
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

Аннотация: В статье представлены материалы о направлениях использования не пищевых отходов при переработке птицы. Описан процесс мойки пера птицы, технологическая линия производства муки из пера птицы. Указан недостаток используемой машины для предварительного обезвоживания пера птицы. Предложена модернизированная конструкция машины.

Abstract. This article presents the materials about directions of utilization of non-food wastes after birds' stuff pro-cessing. The process of washing of feather of bird and the technological line of production of birds' feather flour are described. The disadvantages of the machine for the initial birds' feather dehydration are indicated.. The modernized machine construction is suggested.

Ключевые слова: не пищевые отходы, обезвоживание, перо, кератин, перьевая мука, производительность.

Keywords: non-food wastes, dehydration, feather, keratin, feather flour, productivity.

В Украине ПАО «Мироновский хлебопродукт» — абсолютный лидер украинского рынка курятины [2,3], а также — крупнейший экспортер мяса птицы. «Мироновский хлебопродукт» (компания создана в 1998 году) - один из крупнейших агропромышленных комплексов Украины. В его состав входят более 20 предприятий, расположенных в Киевской, Черкасской, Днепропетровской, Донецкой, Винницкой, Ивано-Франковской, Херсонской областях. Все предприятия создают замкнутый цикл мясного производства: выращивание зерновых, изготовление комбикормов, выращивание родительского поголовья скота, производство и переработка мяса КРС, МРС, свиней и птицы. Общая мощность трех птицефабрик компании, занимающихся производством мяса бройлеров, составляет около 1,38 млн. птиц в неделю. Эти фабрики обслуживаются двумя племенными фермами (включающими мощности по производству инкубационных яиц), двумя комбикормовыми заводами (с общей годовой мощностью около 700 тыс.т).

Убой птицы [1] осуществляют в специализированных убойных предприятиях или в убойных цехах птицеводческих предприятий с применением таких технологий промышленной переработки птицы после убоя:

- полупотрошение;
- потрошение;

– потрошение с разборкой и обвалкой потрошенных тушек.

Общее количество непищевых отходов при переработке птицы методом полупотрошения составляет 15,3...18,5 % от живой массы птицы, (в том числе: перья, пух, подкрылок) - 4,0...5,7 %, технические отходы (кровь, кишечника, железистые желудки) - 10,1...12,8 %. При переработке птицы методом потрошения общее количество непищевых отходов достигает 23,7...28,3 % от живой массы птицы, в том числе: перья, пух, подкрылок - 4,0...5,7 %, технические отходы (кровь, пищевода, зоба, кишечника, железистые желудки, желчные пузыри, трахеи, селезенки, яичники, яйцеводы, семенники, кутикулы) - 11,9...14,3 %; головы (без шей) - 2,7...5,6 %, ноги - 2,5...4,6 %. Общее количество непищевых отходов при переработке выпотрошенной птицы с разборкой и обвалованием тушек составляет 20,0...39,4 % от массы потрошенной тушки, в том числе: кости - 18,4...36,9 %; почки с легкими - 1,4...2,8 %.

По химическому составу и физико-механическим свойствам непищевые отходы убоя птицы разделяют на следующие виды:

- кератин содержащие отходы (перо - пуховое сырье, головы, ноги);
- кровь;
- мягкие отходы (технические отходы, легкие, почки);
- костные отходы (головы, ноги, кости после механической обвалки птицы).

Все эти отходы содержат белки (протеины), жиры (липиды), кальций, фосфор, магний, натрий, витамины и микроэлементы, т.е. ценные питательные вещества для кормления животных и птицы. Но в том виде, в котором они находятся в сырье, большинство из них в недостаточной степени усваиваются птицей, поэтому для повышения их переваримости они требуют специальной обработки. Кроме того, к кормовой муке из отходов ставятся определенные требования к размеру частиц, влажности, содержанию жира, допустимого уровня микробной обсемененности и т. п. Для выполнения всех этих требований, сырье на той или иной стадии технологического процесса приготовления кормовой муки также измельчают, стерилизуют, высушивают, при необходимости обезжиривают.

Кератин содержащее сырье содержит 85...90 % сырого протеина, основу которого составляет белок кератин, 6...7 % влаги и 3...5 % минеральных веществ. В наиболее чистом виде кератин содержится в перо - пуховом сырье, когтях, шпорах и роговых пластинках ног, клювах птицы. Белок кератин имеет большую молекулярную массу, сложную структуру и в сыром виде, даже если измельчить его до состояния муки, практически не усваивается птицей. Особенностью кератина также является высокое содержание серосодержащих аминокислот (цистина и цистеина). Прочность и устойчивость кератина обусловлена наличием в нем дисульфидных связей между пептидными цепочками белка. Если разорвать тем или иным способом (путем гидротермической обработки, обработки кислотами, щелочами, ферментами и т.д.) эти дисульфидные связи, молекулы кератина разрываются на отдельные пептидные звена, доступные действию протеолитических ферментов пищеварительной системы птицы.

Кровь с химической точки зрения представляет собой коллоидный раствор, в котором содержится 80...81 % влаги, около 17 % протеина (90 % от массы сухого вещества), а также ряд других веществ: минеральных солей, ферментов, гормонов, микроэлементов, биологически активных веществ. Протеин крови относится к легкоусвояемым, поэтому это сырье достаточно подвергнуть «мягкой» термообработке с целью стерилизации и сушки.

Мягкие отходы содержат 57...63 % влаги и 43...37 % сухих веществ. Около 80...90 % сухих веществ представляют собой белки (в основном коллаген, эластин и ретикулин), 19...10 % жиры, 0,4...0,5 % - неорганические вещества. Названные белки без надлежащей обработки имеют недостаточно высокий коэффициент переваримости (30...40 %), поэтому для его повышения это сырье подвергают соответствующей обработке по специальным режимам, которые, однако, более «мягкие», чем для кератин содержащего сырья. Костное сырье содержит 30...35 % влаги и 70...65 % сухих веществ, в том числе (от сухого вещества): 28...33 % протеина, до 45 % минеральных веществ, до 25 % жира. Минеральные вещества содержат 21...25 % кальция, 1 % магния, 9...13 % фосфора, 5 % угольной кислоты. Основу протеина костей составляет белок коллаген. Костное сырье характеризуется значительной механической прочностью и размером отдельных частей. Для превращения в кормовую муку костное сырье подвергают термообработке для деструкции (разваривания) костной ткани, повышения переваримости коллагена.

Одной из трудно решаемых проблем является проблема утилизации пуха и пера. Этот продукт переработки птицы является дополнительным ресурсом полноценного животного белка, протеина для создания кормовых добавок и пищевых продуктов. Кормовой продукт, вырабатываемый из пера птицы – перьевая мука. В перьевой муке содержится не менее 70 % протеина, что почти в два раза больше по сравнению с соевым шротом.

В зависимости от назначения и местоположения различают три основных вида перьев: пух, контурные и маховые перья. Основные виды, в свою очередь, подразделяются на:

пух: собственно, пух - перо с мягким стержнем и слабым развитием опахала, находится на теле, предназначен для теплоизоляции;

пуховые перья - перья промежуточного типа между контурными и пухом, имеют относительно длинный и упругий стержень, но их бородки не сцеплены в пластинку опахала.

Контурные перья: покровные - на теле, делают форму тела обтекаемой.

Маховые перья: первого порядка - на крыльях; второго порядка - на крыльях; рулевые - на хвосте.

Технологический процесс переработки пера начинается с мойки. Операция мойки преследует цель чистки пера от загрязнений, избытков жира и устранения специфичного аромата сырого пера. При сильном загрязнении сырья целесообразно предварительно удалить число примесей механическим методом (обеспыливанием), а наиболее связанные с пером загрязнения - промывкой. Цель обеспыливания пера заключается в том, чтоб разделять от перо-пухового сырья инородные примеси диаметром менее 10 мм, обломки перьев и пыль. Обеспыливают сначала сырье с крупным содержанием песка, фальсификаторов для роста массы, производственного и складского мусора. Обеспыливание ведётся на особых машинах и автоматах. Обеспыленное перо посредством вакуумного разрежения затаривается в мешки, либо по трубопроводу засасывается в бункер мочной машины. Длительность наполнения и обеспыливания можно регулировать. Производительность машины 40...100 кг/ч.

Применяют обработку пера в щелочном растворе либо моющими веществами. При этой обработке перо моют в водном растворе, следовательно, удаляют растворимые в воде загрязнения. Жироподобные вещества в форме эмульсии находятся в коллоидном растворе. Мойка - непростой коллоидно-химический процесс. На результативность мойки действуют почти все причины: вид птицы, качество пера (свежешипаное, съемное, бывшее в употреблении и т. д.), степень загрязнения; смачивающая способность употребляемого моющего средства, его эмульгирующее и диспергирующее действие, грязеулавливаемость и т. п.; степень промывки, длительность мойки, жидкостный коэффициент, показатель pH раствора и т. д. Количество употребляемого моющего средства зависит от метода мойки, используемого оборудования, свойства воды, загрязненности промываемого пера. Перо чувствительно реагирует на действие щелочи, потому предпочтение отдают мойке в нейтральной среде. Но нередко, особенно при наличии мощного загрязнения и жира, наиболее эффективны многообразные щелочи при соблюдении подходящего показателя pH моющего раствора. При мойке в растворе щелочно-синтетического моющего средства не повреждается либо повреждается незначительно, если pH раствора не поднимается выше 8,9...9,0. Нейтральное синтетическое моющее средство не повреждает перо, но для загрязненного пера пригодно только при многократных повторениях циклов мойки. При мойке, как в щелочной, так и в нейтральной среде с синтетическими продуктами для улучшения моющего эффекта употребляют нейтральные добавки. Температура мойки, ее длительность, жидкостный коэффициент и pH моющего раствора взаимосвязаны границей собой и действуют на цвет и качество промытого пера. Важным фактором высококачественной мойки пера является температура моющего раствора. С ростом температуры понижается множество адсорбции границ пером и загрязнением, увеличивается молекулярная однородность моющего средства. Наиболее высокая температура содействует наилучшему растворению отдельных загрязнителей, расплавляет жиры и воск, что обуславливает действенное их удаление с поверхности пера. В зависимости от используемого моющего средства и чувствительности кератинового вещества пера температура мойки может находиться в пределах 20...60° С.

На предприятиях компании по переработке бройлеров, с целью создания замкнутого цикла, работает цех утилизации. Оборудование цеха (отделения) переработки отходов должно обеспечивать последовательность выполнения следующих технологических процессов:

- накопление отходов убоя птицы (перо - пухового сырья, крови, технических отходов и т.д.);
- очистка сырья от посторонних примесей;
- дозированные загрузки сырья в автоклав или аппарат другого типа, в котором будет осуществляться его тепловая обработка;
- охлаждение, при необходимости обезжиривание, измельчение и просеивание шквары;
- затаривания кормовой муки;
- дезодорацию паров и газов.

Технологический процесс переработки пера и крови следующий. Перо транспортируется из бункера пера посредством червячного конвейера и распределяется в один из трех котлов для пера посредством реверсивного червячного конвейера и загрузочного клапана.

Загрузка пера контролируется системой электронной загрузки через систему контроля PLC. Кровь транспортируется из танка крови при помощи насоса непосредственно в один из трех котлов. Загрузка крови в котел контролируется системой электронной загрузки через систему контроля PLC.

Количество пера и крови, которое соответственно будет загружено в котел, может быть выбрано на PLC контроле для обеспечения однородности смеси во всех обработанных партиях. Сырье в котле

нагревается и прибл. после 5 минут начинается процесс гидролиза. Гидролиз обычно происходит при 2,5 Бар в течение 30 минут, но давление гидролиза и время может быть отрегулировано в PLC контроле процессов. После гидролиза давление сбрасывается и начинается сушка продукта.

Когда материал высушивается и предварительно установленный уровень влажности достигается, автоматический контроль влажности остановит котел и даст сигнал для разгрузки котла. Разгрузочный клапан открывается, и котел дает обратный ход мешалке для разгрузки и разгружает сырье в приемный танк.

PLC контролирует заполняющие клапана для пера и крови и дает сигнал для начала заполнения каждой системы. В дальнейшем главный паровой вентиль и выходной клапан для пара на котле контролируется. Окончательно, PLC контролирует разгрузку, когда оператор санкционирует разгрузку котла.

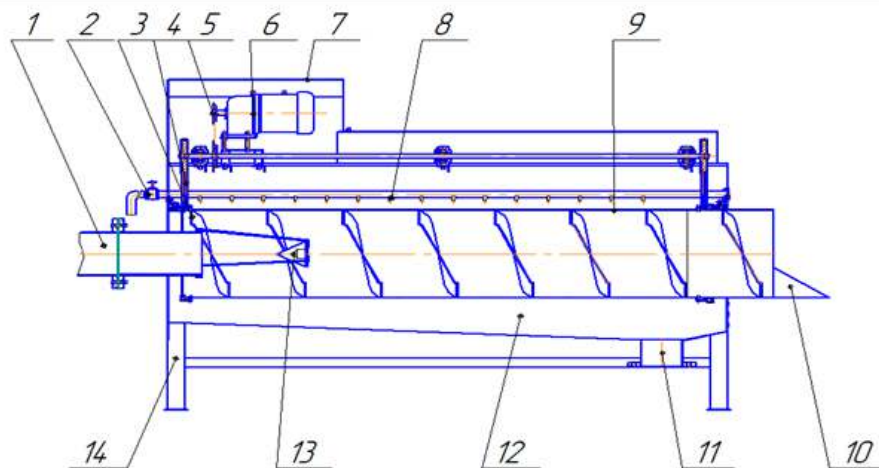
Из приемного танка крове-перьевой муки транспортируется червячным конвейером в вибрационное сито для отделения возможных чужеродных частиц подобных резиновым перо щипальным пальцам из крове-перьевой муки.

Из вибрационного сита сырье перемещается охлаждающим червяком в мельницу. Этот червяк охлаждается посредством воздуха, удаляемого через него. Воздух удаляется через фильтр, смонтированный на верхней части червячного конвейера, во избежание удаления частиц пыли с воздухом.

В мельнице мука размалывается в необходимый размер (обычно максимально 2 мм). Из мельницы мука перемещается конвейером в червяк, питающий элеватор. Из элеватора сырьё поступает в червяк, оборудованный двумя дополнительными выходами со скользящей выпускной воронкой для разгрузки муки в контейнеры.

В технологической линии производства муки из пера птицы после накопителя и моечной машины для пера установлена машина для предварительного обезвоживания пера.

Машина для предварительного обезвоживания пера имеет загрузочную трубу 1 для входа пероводяной смеси в машину, раму 14, моечный барабан 9. На внутренней поверхности барабана 9 закреплена спиральная лента 3 для транспортировки сырья. Барабан 9 подвешен на ремнях клиноременной передачи 4, которая получает вращательное движение с помощью звездочки 5 и привода 6 расположенных на кожухе 7. Под барабаном 9 расположена ванная 12 для сбора загрязненной воды. Между кожухом и барабаном расположено ополаскивающее устройство 8, для удаления перьев, которое забилося в отверстия перфорации. Ополаскивающее устройство имеет запорный магнитный клапан 2. Грязь из ванны удаляется через клапан 11, а сырье выгружается из машины через лоток 10.



1 - выходная труба; 2 - запорный вентиль; 3 - спиральная лента; 4 - клиноременная передача; 5 - звёздочка; 6 - мотор-редуктор; 7 - кожух; 8 - ополаскивающее устройство; 9 - перфорированный барабан; 10 - лоток; 11 - клапан; 12 - ванна; 13 - разрушительное устройство (конус); 14 - рама.

Рис. 1. Машина для предварительного обезвоживания пера

При эксплуатации машины был выявлен значительный недостаток. При окончании смены вода, находящаяся в трубопроводе вместе с оставшимися в ней перьями, скапливается в самой нижней точке трубопровода. Сырьё слёживается и уплотняется, и образуется «пробка» из пера. В момент пуска

машины, насос, который прокачивает перо-водяную смесь по подающему трубопроводу, развивает давление, которое заставляет «пробку» пролетать сквозь машину для предварительного обезвоживания пера. Это приводит к необходимости останавливать линию и собирать необработанное перо, что приводит к затратам времени и снижению производительности как машины, так и линии в целом.

Для предотвращения указанного недостатка предлагается снабдить машину конусом 13 (рис. 1) для разрушения «пробки» из пера и таким образом избежать потерь сырья, технологического времени и остановок линии.

По предложенной модернизации получен патент Украины на полезную модель № 94827 [4].

Модернизация машины для предварительного обезвоживания пера птицы даёт возможность избежать потерь технологического времени, потерь сырья и остановок технологической линии для устранения указанного недостатка.

Литература

1. Оборудование для переработки мяса / Кат. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. — 220 с.
2. Как перерабатываются отходы забоя птицы [Электронный ресурс] Режим доступа <http://ptitcevod.ru/produkcija-pticevodstva/kak-pererabatyvayutsya-otxody-zaboya-pticy.html>.
3. Мироновский хлебопродукт [Электронный ресурс] Режим доступа http://file.liga.net/company/2288-mironovskii_hleboprodukt.html.
4. Пат. на корисну модель 94827 Україна, МПК А 22С 21/00. Машина для попереднього зневоднення пера /Всеволодов О.М., Гладушняк О.К., Катрюк Я.В., Воробей Д.П.; заявник та патентовласник Одес. нац. акад. харч. технологій. - № u 2014 02720; заявл. 25.03.2008; опубл. 10.12.2014, Бюл. №23.

УДК 664.723.047.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ВАКУУМНАЯ СУШИЛКА Бурдо О.Г., Мордынский В.П., Светличный П.И., Ананийчук Э.Ю. Одесская национальная академия пищевых технологий

ENERGY EFFICIENT VACUUM DRYER Burdo O.G., Mordynsky V.P., Svetlichny P.I., Ananiychuk E.Yu. Odessa National Academy of Food Technologies

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы обезвоживания термолabile пищевого сырья. Сравниваются эффективность использования энергии и анализируются энергетические балансы в выпарных аппаратах и в сушильных установках. Определены проблемы современных вакуумных сушилок. Приведена инновационная конструкция вакуумной сушилки с двухфазным испарительно-конденсационным контуром для подвода теплоты к сырью. Обсуждаются преимущества конденсации паров воды непосредственно в самой сушильной камере. Приведены результаты экспериментального моделирования сушки в вакуумной установке морепродуктов и растительного сырья.

Abstract. The problems of dehydration of thermolabile food raw materials are considered. Energy efficiency is compared and energy balances are analyzed in evaporators and dryers. The problems of modern vacuum dryers are identified. An innovative design of a vacuum dryer with a two-phase evaporative-condensation circuit for supplying heat to raw materials is presented. The advantages of condensation of water vapor directly in the drying chamber are discussed. The results of experimental modeling of drying in a vacuum installation of seafood and vegetable raw materials are presented.

Ключевые слова. Вакуумная сушилка, энергетика обезвоживания, режимы сушки, морепродукты, растительное сырье.

Keywords. Vacuum dryer, dehydration energy, drying regimes, seafood, vegetable raw materials.

Введение. Производство пищи является энергоемким в развитых странах [1, 2]. Значительные расходы энергии присущи для технологий пищевых концентратов [3], где удаление влаги – одна из основных задач. В основном, применяются два принципа: выпаривание и сушка. Казалось бы, у этих процессов одинаковые задачи - перевести в пар влагу. Но затраты энергии на удаление единицы влаги

оказываются существенно разными. Если энергетический КПД самого несовершенного процесса выпарки 85%, то лучшие сушильные технологии не превышают 40% [2 - 6] (рис.1).



Рис.1. Энергетика обезвоживания.

Причины в том, что в конвективных сушилках задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду. Эти противоречия не имеют практического решения, и резервы повышения эффективности использования энергии [7 - 8] в конвективных сушилках практически исчерпаны.

Процесс выпаривания по классификации относится к тепловым, его движущей силой является разность температур. Механизмы этих процессов хорошо изучены. Вопросы моделирования и проектирования выпарных аппаратов практически решены. Что касается сушки – то это массообменный процесс, движущей силой которого является разность парциальных давлений пара на поверхности продукта и в окружающей среде. Сушка сложный и продолжительный процесс. Если фундаментальные основы сушки считаются общепризнанными, то практические задачи проектирования разнообразных сушильных установок для большинства типов не решены [2 - 8].

Максимальная движущая сила в процессе сушки создается в вакуумных установках, более того, эти сушилки обеспечивают мягкие режимы обезвоживания. Эти обстоятельства открывают им перспективу для сушки термолабильного пищевого сырья. Но достаточно сложные требования к конструкции, отсутствие систематических исследований вакуумных сушилок для пищевых технологий создают определенные барьеры при их практическом внедрении. Поэтому актуальны поиски прогрессивных технических решений, использование современных принципов организации процессов тепло-массопереноса [9 - 15], исследование кинетики сушки в инновационных вакуумных аппаратах.

Формулировка научно-технической гипотезы. В большинстве конструкций вакуумных сушилок энергия, необходимая для осуществления процесса влагоудаления, подводится от полок, в которых циркулирует теплоноситель. Как правило, это воздух либо вода. Такая схема подвода энергии обладает существенными недостатками: температура теплоносителя по поверхности полок разная. Это влияет на качество готового продукта, повышает продолжительность сушки. Самостоятельной проблемой современной вакуумной сушильной техники является вопрос поддержания стабильного давления в аппарате. Проблема связана с ростом гидравлического сопротивления пароотводных каналов, которое резко повышается при увеличении производительности. Поэтому, традиционные вакуумные сушилки для термолабильного сырья работают в режиме постоянной откачки воздуха и паров воды из сушильной камеры с помощью вакуум-насоса. На это расходуется до 5% потребляемой энергии, усложняются условия эксплуатации установки.

В работе формулируется гипотеза: «в условиях стабильного вакуума поверхность для конденсации паров можно располагать внутри сушильной камеры и отводить из установки не пар, а конденсат, что значительно снизит гидродинамическое сопротивление линии отвода удаляемой влаги, упростит эксплуатацию и даст возможность четко контролировать кинетику удаления влаги по расходу конденсата. При этом организация эффективного подвода энергии при граничных условиях 1 рода обеспечивается за счет теплопередачи посредством двухфазного испарительно-конденсационного контура». Для реализации этого положения необходимо решить две технических проблемы. Во-первых, обеспечить надежную конструкцию системы вакуумирования. Во-вторых, разработать инновационную систему подвода энергии.

Схема вакуумной сушильной установки. В основе разработанной установки эти 2 положения реализованы. Первое – охлаждаемая стенка для конденсации удаляемых из сырья паров располагается внутри вакуумной камеры. Второе – подвод теплоты к продукту происходит с помощью двухфазного испарительно-конденсационного контура. Схема разработанной установки приведена на рис.2.

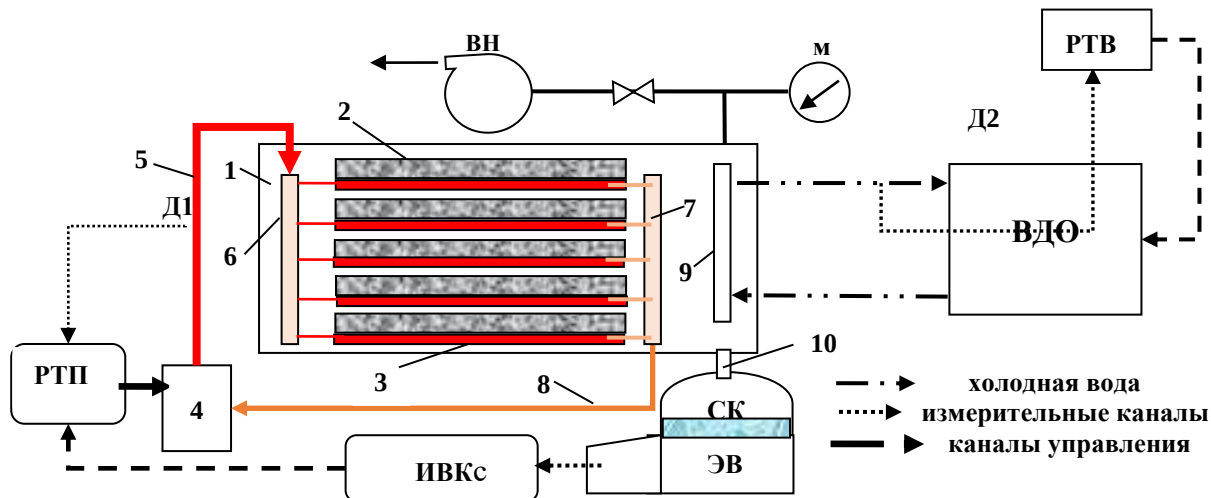


Рис.2. Схема вакуумной сушилки с двухфазным испарительно-конденсационным контуром.

Установка состоит из вакуумной сушильной камеры 1, в которой на поддонах 2 размещается слоем сырье. Поддоны устанавливаются на полках 3, которые являются конденсаторами двухфазной испарительно-конденсационной системы, состоящей из парогенератора 4, паропровода 5, парового коллектора 6, коллектора конденсата 7 и конденсатопровода 8. Образовавшийся при сушке пар конденсируется на холодной поверхности 9, охлаждаемой водой циркулирующей из агрегата ВДО, состоящего из холодильной машины и регулятора температуры (РТВ), стабилизирующего температуру холодной воды при контроле датчиком Д2 в пределах 1,5 °С. Вакуум в камере 1 обеспечивается вакуум-насосом (ВН) и контролируется образцовым вакуумметром (М). Датчик Д1 контролирует температуру пара, его сигнал принимает регулятор (РТП) и стабилизирует температуру пара в пределах 1 °С. Задание уровня температуры пара поступает с измерительно-вычислительного комплекса (ИВК).

Образовавшийся на поверхности 9 конденсат стекает на дно камеры и через патрубок 10 собирается в сборнике (СК), который устанавливается на электронных весах (ЭВ). Таким образом, по весу конденсата регистрируется производительность установки по удаленной влаге.

Из объема двухфазной испарительно-конденсационной системы удален воздух, т.е. температура насыщения рабочего тела соответствует условиям парогенератора 4. Отличительной характеристикой системы является простота поддержания одного уровня температур на всех полках 3 (рис.2). Технические характеристики вакуумной сушилки приведены в табл.1.

Таблица 1. Основные технические характеристики вакуумной сушилки

	Параметр	Значение
1	Мощность, потребляемая парогенератором, Вт	3000
2	Количество полок и поддонов, шт	16
3	Загрузка поддона, кг	2 – 2,5
4	Давление в сушильной камере, кПа	5 - 15
5	Температура сушки, °С	40 - 90
6	Температура холодной воды, °С	4 - 20

Проектирование двухфазных испарительно-конденсационных контуров проводилось на основе исследований [16 - 17].

Результаты исследований.

Испытание установки проводилось на различном виде пищевого сырья. Результаты исследования кинетики сушки морепродуктов приведены на рис.3.

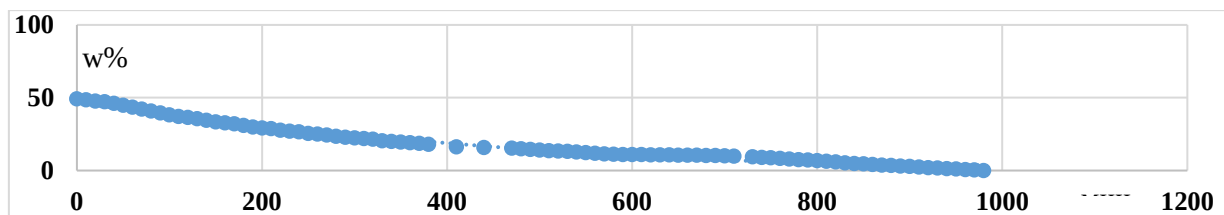


Рис. 3 Кинетика сушки мидий и креветок.

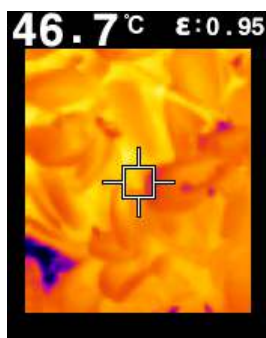


Рис.4. Термограмма процесса сушки мидий.

Важным параметром при сушке морепродуктов является температура сырья. Для сохранения пищевого потенциала сырья температура термообработки не должна превышать 60 °С. Поэтому система теплоподвода ограничивала верхний уровень температур в камере 55 °С. Стабилизировалась температура пара, поступающего в коллектор 6 (рис.2). температура продукта в кассетах 3 была ниже на 5 - 8 °С. Это подтверждается термограммами (рис.4), полученными с помощью тепловизионной съемки. Видно, что практически вся поверхность продукта составляла менее 47 °С. Ограничения температуры на входе пара в сушильную камеру обеспечивают мягкие, регламентируемые режимы термообработки, и термограммы процесса убедительно свидетельствуют об этом.

Проведены испытания разработанной вакуумной сушилки при обезвоживании растительного сырья. Массовая паропроизводительность фиксировалась по весу удаленного конденсата (рис.5).

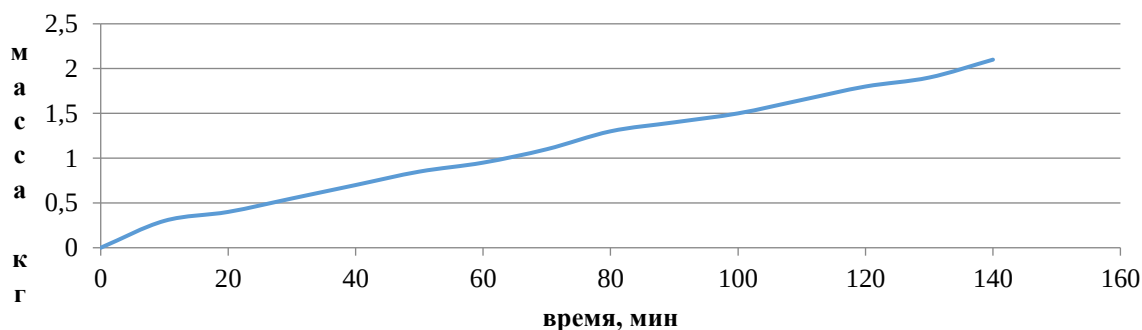


Рис.5. Кинетика обезвоживания растительного сырья.

Цепочка термических сопротивлений при сушке растительного сырья характеризуется меньшими значениями, чем в случае с морепродуктами. Для мидий теплоперенос к влаге происходит через ракушки. Именно они являются значительным барьером для потока теплоты к влаге. Сравнительный анализ ключевых параметров сушки проведен в табл.2.

Таблица 2. Режимы сушки морепродуктов и растительного сырья в вакуумной установке

Сырье	Начальные условия		Параметры сушки	
	Загрузка, кг	Влажность, %	Температура, °С	Скорость удаления влаги
Мидии и креветки	15 2	50	55	0,11...0,05%/мин
Овощи: морковь свекла яблоки	4 4 3,6		60	2...1,7 кг/час

Мидии загружались в 7 кассет, а креветки – в 1. Растительное сырье загружалось в 6 кассет. Полученные образцы сушеных продуктов по технологическим параметрам соответствовали регламенту.

Выводы. Доказана возможность организация процесса сушки в вакууме при конденсации пара водяного пара непосредственно в объеме сушильной камеры. Необходимость вакуумирования камеры ограничивается 1 разом в смену.

Доказана возможность теплопередачи к поверхности продукта посредством двухфазного испарительно-конденсационного контура. Термограммы продукта, полученные с помощью тепловизора, свидетельствуют о незначительном (в пределах 1 °С) отклонении температур во всех кассетах. Уровень температур и интенсивность выхода пара из сырья показывают, что установка отвечает требованиям к инновационным образцам энергоэффективной техники сушки.

Література.

1. Gromadzki, G. Energy game : Ukraine, Moldova and Belarus between the EU and Russia /G. Gromadzki, W. Konończuk; Stefan Batory Found. – Warsaw: Stefan Batory Found., 2007.– 47 p
2. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.
3. Бурдо О.Г. Энергетика экоиндустрии пищевых концентратов /Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О. // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2015г. – №3 (29) – С.112–118.
4. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка – Киев: Академперіодика, 2011.- 376 с.
5. Потапов В.А., Якушенко Е.Н. Повышение энергоэффективности сушки виноградных выжимок в массообменном модуле с кондуктивным подводом теплоты //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2013. – Вип.43, Т2. – с.179-184..
6. Bernic Mircea, Raducan Marcel, Ciobanu Eugeniu, (2013). Drying Kinetics of Sunflower Seeds using Pulsed UHF Energy Intake, TEM Journal, 2(4), pp. 305-308.
7. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
8. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Энергетический аспект /Труды межд. науч. тех. сем. Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. – Воронеж: 2010.- с. 478-487.
9. Burdo O.G. Nanoscale effects in food-production technologies // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2005.- Vol.78, Issue 1.- pp. 90-96.
10. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии. Херсон, 2013 – 294с.
11. Бурдо О.Г. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях /Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.// Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2015г. – №1 (27) – С.79–85
12. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.
13. The Nanotechnological Innovation in Food Industry [Text] / O.G. Burdo, A. V. Zykov, S. G. Terzиеv, N.V. Ruzhitskaya // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) – 2016 - Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150.
14. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
15. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69- 79.
16. Бурдо О.Г., Смирнов Г.Ф., Терзиев С.Г., Зыков А.В. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб – Одесса, «ИНВАЦ», 2014 – 376с.
17. Смирнов Г.Ф. Бурдо О.Г., Моделирование процессов в тепловых трубах и термосифонах – Одесса: Полиграф, 2012 – 294с.

УДК 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ОДИНИЧНИХ КРАПЕЛЬ КРОХМАЛЬНОЇ ПАТОКИ ИГ-30 ЯК ОБ'ЄКТУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ

Шаркова Н. О., канд. техн. наук, ст. наук. співр. Турчина Т. Я., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Жукотський Е. К., Декуша Г. В., канд. техн. наук, Костянець Л. О.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

INVESTIGATION OF DRYING SINGLE DROPS OF STARCH SYRUP IG-30 AS SPRAY DRYING OBJECT

Sharkova N.A., Ph.D., Turchyna T.J., Ph.D., Zhukotsky E.K., Dekusha G.V., Ph.D., Kostyanets L.A.
Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv

Анотація. Вивчено вплив температурних режимів на кінетику сушіння крапель крохмальної патоки, морфологічні характеристики висушених часток та визначено раціональні параметри її розпилювального сушіння.

Abstract. The influence of temperature conditions on the kinetics of drying drops of starch syrup, morphological characteristics of the dried particles and set rational parameters of spray drying.

Ключові слова: температура теплоносія, одинична крапля, крохмальна патока, кінетика сушіння.

Keywords: coolant temperature, a single drop, starch syrup, drying kinetics.

В Україні виробництво крохмальної патоки, солодових, полісолодових екстрактів та інших харчових продуктів дієтичного та лікувально-профілактичного призначення із злакових культур протягом багатьох років залишається актуальним, оскільки ця продукція користується попитом у вітчизняних і закордонних виробників харчової, парфумерної, фармацевтичної галузей. Проте рідка пастоподібна форма концентратів з вмістом сухих речовин 75...80% обумовлює певні складності їх використання через велику в'язкість та адгезійність.

Промислове виробництво порошкової форми таких продуктів доцільно здійснювати на розпилювальних сушарках, де, як відомо [1,2], забезпечується збереження усієї гами біологічно активних складових вихідної сировини за рахунок швидкоплинності (1-2с) процесу зневоднення продукту у диспергованому стані у факелі розпилю за умов низькотемпературного випарювання основної маси вологи при температурі «мокрого термометру». Майже висушені мікрочастки в процесі подальшого вітання в камері в складі двофазного потоку (теплоносії – дисперсний порошок) прогріваються до температури теплоносія на виході з камери [3].

Організація промислового виробництва сухої форми крохмальної патоки вимагає вивчення продукту як об'єкту розпилювального сушіння та його здатності до висушування з отриманням сухої й міцної за структурою частки, що необхідно для отримання порошку з відповідними структурно-механічними характеристиками для забезпечення своєчасного видалення його з зони термічної дії в камері сушарки.

Мета роботи – дослідження процесу сушіння крапель розчинів крохмальної патоки ИГ-30 в потоці нагрітого теплоносія для визначення раціональних температурних режимів розпилювального сушіння.

Дослідження проводились на модернізованому експериментальному стенді Інституту технічної теплофізики НАН України (далі – ІТТФ НАНУ) для дослідження процесу сушіння одиничних крапель в потоці нагрітого теплоносія, оснащеному цифровим реєстратором температури краплі у часі та цифровим мікроскопом, який транслює зображення краплі й усі операції, що здійснюються з нею, на монітор комп'ютера, де одночасно проводиться відеозапис процесу сушіння краплі. Накопичені на цифровому реєстраторі температури експериментальні дані за допомогою спеціальної комп'ютерної програми розгортаються у відповідні термограми, що дає можливість спростити та прискорити процес їх обробки, а також підвищити якість їх порівняльного аналізу в умовах єдиних за масштабом шкал.

Для проведення досліджень були підготовлені 5 розчинів крохмальної патоки ИГ-30 з вмістом сухих речовин: 40%, 45%, 50%, 55% та 60%. Дослідження процесу сушіння одиничних крапель цих розчинів проводились при температурах теплоносія (повітря): 140°C, 160°C, 180°C та 200°C.

Кінетика сушіння. За результатами обробки термограм отримано експериментальні дані, за якими були побудовані кінетичні залежності процесу сушіння крапель крохмальної патоки, наведені на рис.1-6.

Підвищення температури теплоносія від 140°C до 200°C сприяє, як видно на рис.1, пришвидшенню прогрівання крапель у 2 рази, при цьому для $C_0 \geq 50\%$ швидкість прогрівання у 1,5-2,0 рази більша, ніж для $C_0 = 40\%$. За таких умов відносна тривалість стадії кіркоутворення скорочується в 1,2-1,5 рази, про

що свідчать представлені на рис. 2 залежності $\tau_{кр2}/\tau_{заг} = f(T_n)$. Це сприяє й скороченню відносної тривалості $\tau_{кр3}/\tau_{заг}$ (рис. 3) сушіння крапель до крапки кр.3 на термограмах: для $C_o=40\%$ – в 1,4 рази, для $C_o=50\%$ – у 1,5 рази і для $C_o=60\%$ – вже у 2 рази. Проте скорочення цих стадій відбувається лише до температури теплоносія 180°C , вище якої значення $\tau_{кр2}/\tau_{заг}$ та $\tau_{кр3}/\tau_{заг}$ залишаються практично постійними (рис. 2, 3).

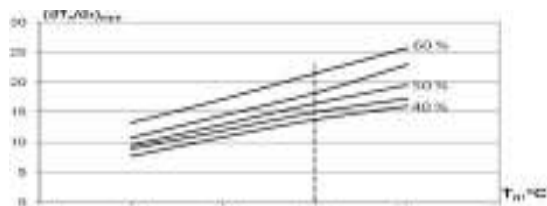


Рис. 1. Кінетичні залежності $(dT_k/dt)_{крк}=f(T_n)$ для крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

Як правило, скорочення відносної тривалості зневоднення крапель до крапки критичної кр.3 на термограмі у загальному часі процесу їх сушіння $\tau_{заг}$ компенсується подовженням заключної стадії досушування τ_v (рис. 4). При підвищенні температури теплоносія зі 140°C до 180°C значення $\tau_v/\tau_{заг}$ зростають у 1,5-1,7 рази, що характерно для колоїдних високов'язких розчинів. Збільшення температури теплоносія вище 180°C , як видно на рис.4, вже не чинить істотного впливу на значення $\tau_v/\tau_{заг}$ для усіх концентрацій розчинів. Слід зазначити, що через зменшення темпу прогрівання у стадії досушування крапель розчинів з $C_o \geq 50\%$ (рис.5) значення $\tau_v/\tau_{заг}$ для цих розчинів збільшуються в середньому у 1,5 рази у порівнянні з $C_o < 50\%$.

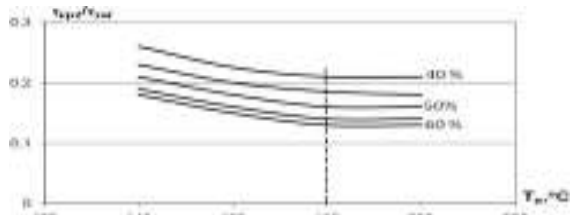


Рис.2. Кінетичні залежності $\tau_{кр2}/\tau_{заг}=f(T_n)$ для крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

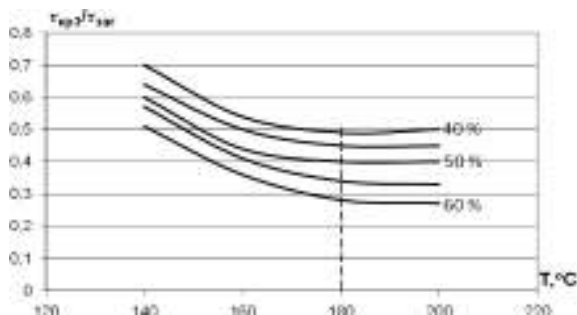


Рис. 3. Кінетичні залежності $\tau_{кр3}/\tau_{заг}=f(T_n)$ для крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

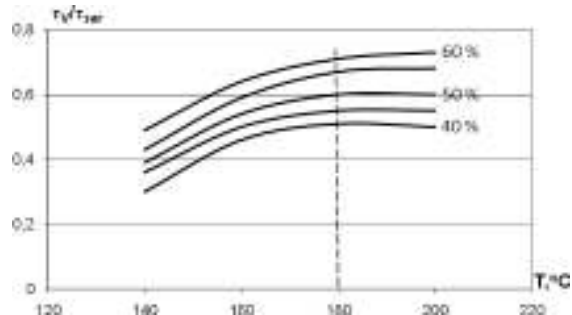


Рис. 4. Кінетичні залежності $\tau_v/\tau_{заг}=f(T_n)$ для крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

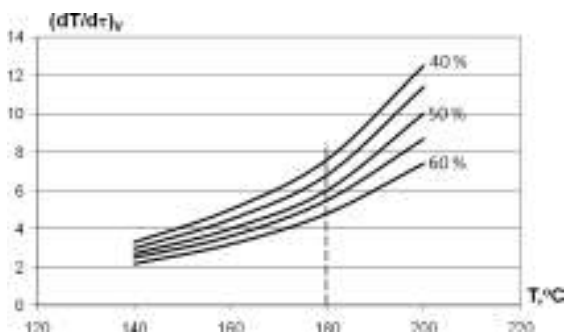


Рис.5. Кінетичні залежності $(dT_k/dt)_v=f(T_n)$ для крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

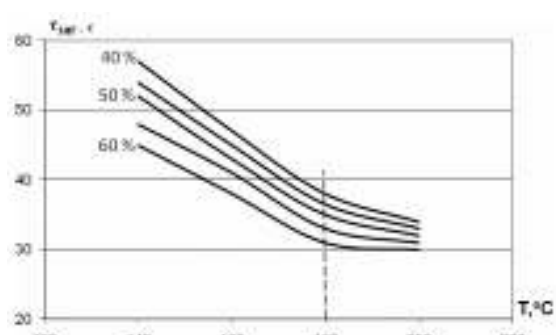


Рис. 6. Залежності $\tau_{заг}=f(T_n)$ загального часу сушіння крапель розчинів крохмальної патоки різного вмісту сухих речовин.

Аналіз кінетичних залежностей $\tau_{заг}=f(T_n)$ (рис. 6) показує, що при підвищенні температури теплоносія від 140°C до 180°C скорочення часу сушіння крапель розчинів в залежності від $C_o=40\ldots 60\%$ складає відповідно 35...25%. Вище $180\ldots 190^\circ\text{C}$ траєкторія кривих $\tau_{заг}=f(T_n)$ стає більш пологою, що

свідчить про зниження впливу температури теплоносія на час сушіння і є підставою вважати цю температуру (180...190°C) граничною.

Характеристика висушених часток. Динаміка зміни форми та розмірів крапель при сушінні крохмальної патоки ИГ-30, як показав аналіз отриманих відеоматеріалів та кінограм, свідчить про значні трансформації структури крапель, які, починаючи зі стадії кіркоутворення, ще в більшій мірі продовжуються на стадіях кипіння та досушування. Відзначається вплив концентрації сухих речовин на ступінь деформації форми крапель. Так, при температурі теплоносія 140°C з підвищенням концентрації розчинів від 40% до 60% спостерігається більш швидкий початок роздування крапель в стадії кипіння. Процес періодичного роздування і ущільнення цих крапель тривав практично до повного завершення процесу сушіння. В результаті висушені частки мали більш роздуту пухляку структуру, їх розміри були переважно більшими за початкові $\delta_{\text{кін}} \geq \delta_0$. Більш того, висушені частки розчинів з $C_0=50\ldots 60\%$ були в 1,5-1,8 рази більші за частки, отримані з розчинів з $C_0 < 50\%$.

При збільшенні температури до 180...200°C спостерігається ущільнення структури часток з включенням повітряних бульбашок. Розміри їх були значно менші за отримані при $T_{\text{п}}=140^\circ\text{C}$, але не менші за початкові $\delta_{\text{кін}} \approx \delta_0$. Це свідчить про те, що при більших температурах (180...200°C) сушіння досягається покращення умов протікання процесів структуроутворення та теплового переносу.

Структуроутворюючі, паропровідні і міцнісні властивості матеріалу при сушінні, а також його термостійкість та адгезійні властивості висушених часток визначаються його вихідними фізико-хімічними характеристиками. Цим обумовлюється й морфологія висушених часток: форма, щільність, монолітність та міцність, що визначає структурно-механічні характеристики порошку. Тому фізичний стан висушених часток було досліджено в потоці високотемпературного теплоносія і поза його межами після охолодження до температури 40...20°C.

Проведені дослідження підтверджують, що фізичний стан та структуру висушених часток крохмальної патоки визначає не тільки температура теплоносія і концентрація розчинів C_0 , а й хімічний склад матеріалу. Так, характерна особливість крохмальної патоки при сушінні – це перебування висушених часток у в'язко-пластичному стані в ядрі потоку високотемпературного теплоносія і їх склування при охолодженні (рис. 7, 8).



Рис. 7. Дослідження фізичного стану висушених часток ИГ-30, отриманих при температурі 140°C і концентрації розчину

Це пояснюється тим, що через вміст цукристих речовин різної молекулярної маси у кислому середовищі крохмальна патока проявляє властивості, характерні для аморфних речовин та полімерних

матеріалів, що визначає належність її до *термопластичних* матеріалів – найбільш складних об'єктів розпилювального сушіння.

Дослідження показали, що лише при температурі теплоносія 140°C частки крохмальна патока, не проявляли адгезійних властивостей (рис. 7). Проте виявлено вплив концентрації сухих речовин вихідного розчину на властивості структури часток при сушінні. Так, при $C_o=40\ldots 50\%$ частки мали округлу форму та пухирчасту структуру, у потоці теплоносія при торканні були м'якими і піддавались деформації (а, 2 кадр). При зондуванні часток, отриманих з розчину з $C_o=60\%$, мали випадки викиду водяної пари через утворений отвір в поверхневій кірці (за даними відео: відбувалось роздування бульбашок у верхній поверхневій ділянці (рис. 8, б, 2-й кадр). Це свідчить про погіршення умов протікання процесу вологопереносу крізь високов'язку поверхневу кірочку в стадії досушування і затримання залишків вологи в середині частки, що не припустимо.

Як видно з відеоряду (кадр № 4 а, б, рис.7), охолодження часток не викликало зменшення її розмірів. Для часток, висушених з 60%-го розчину, спостерігалось утворення «кратера», як видно в нижній ділянці оболонки частки (б), що характерно для колоїдних розчинів групи III-3 згідно класифікації матеріалів як об'єктів сушіння розпилюванням, розробленої на основі кінетичних закономірностей процесу сушіння [2]. Частки крохмальної патоки, висушені при температурі теплоносія 160...200°C, проявляли в потоці високотемпературного теплоносія термопластичні і адгезійні властивості не залежно від концентрації розчинів (рис.8). Аналіз отриманих відеоматеріалів показав, що при сушінні крапель крохмальної патоки ИГ-30 отримання міцної і монолітної структури часток найменших розмірів і відсутність адгезійних властивостей досягається при охолодженні висушених часток до температури $\leq 40^\circ\text{C}$.



Рис. 8. Дослідження фізичного стану висушених часток ИГ-30 з концентрацією $C_o=45\%$ і 60% , отриманих при температурах теплоносія 160...200°C.

Висновки.

Дослідження показали, що отримання порошкової форми крохмальної патоки ИГ-30 з покращеними структурно-механічними характеристиками на розпилювальній сушарці можливе за наступних теплотехнологічних параметрах:

- вміст сухих речовин у вихідному розчині, що подається в розпилювальну сушарку, має складати $\leq 50\%$,
- температура теплоносія на вході в камеру – $180 \dots 190^\circ\text{C}$,
- висушений порошок на виході з камери має бути охолоджений до температури $\leq 40^\circ\text{C}$.

Література

1. Долинский А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А.Долинский, Г.К. Иваницкий. – К.: Наукова думка. – 1984. – 320 с.
2. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка : В 2-х т. Т. 1 Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – Киев: Академперіодика, 2011. – 376 с.
3. Кремнев О.А. Скоростная сушка / О.А.Кремнев, В.Р.Боровский, А.А.Долинский. – К.: Гостехиздат УССР, 1963. – 382 с.

УДК 664.723.047.59

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ И
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ**

Безбах И. В. канд. техн. наук, Кепин Н. И. канд. техн. наук
Одесская национальная академия пищевых технологий

**USE OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENT EQUIPMENT FOR
HEAT AND MECHANICAL PROCESSING OF FRUIT RAW**

Bezbakh I.V. Ph. D., Kepin N. I. Ph. D.
Odessa National Academy of Food Technologies(ONAFТ); Odessa

Abstract. The weaknesses of equipment for mechanical and thermomechanical treatment of food products are considered. The analysis of grain drying equipment at food enterprises is made. The ways of solving of energy problems in technology of heat treatment of food liquids, drying of dispersed products, separation of stone fruit crops are proposed. The application of fruit treatment by cold method is justified. Designs of dryers and apparatus for heat treatment on the basis of rotating thermosiphons are shown. The basic directions of using apparatus based on rotating thermosiphons are singled out. The results of experimental studies of the drying processes, the heat treatment of foods in the machines with rotating thermosiphons are presented. The design of the experimental setup with rotating thermosyphon is presented. The description of objects of research is given. The technique of experimental studies is presented. The results of experimental studies on drying, heat treatment of products are presented. The models for the calculation of heat and mass transfer processes in heat treatment and drying of food products in these devices are offered. A generalization of the experimental data was carried out using the method of dimensional analysis. A description of the machine of rotary type for separation of stone fruit crops is done. The economic efficiency of the proposed re-direction of primary processing of stone fruit crops is proved. The modified Newton number is used for generalizing the experimental results. The energy characteristics of the machine for processing fruits in a cold way are taken into account when using the Euler number. The criteria equations are suggested for design and optimization of this class of machines. The efficiency of using a device with a rotating thermosyphon in the apple jam line is estimated. The model of thermal energy transformation for the apple jam production line is presented. The proposed devices are able to provide the effective heat transfer in processing of dispersed viscous foodstuffs and to reduce the energy

loss up to 30%. It is established that heat transfer during processing of products in the apparatus with thermosyphon is affected by the frequency of rotation of the condenser, the angle of its tilt and the physical properties of the product.

Аннотация. Рассмотрены недостатки оборудования для механической и термомеханической обработки пищевых продуктов. Предлагаются пути решения энергетических проблем в технологиях термообработки пищевых жидкостей, сушки дисперсных продуктов, разделения плодов косточковых культур. Представлены конструкции сушилок и аппаратов для термообработки на базе вращающихся термосифонов. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов сушки, термообработки пищевых продуктов в аппаратах с вращающимися термосифонами. Предлагаются модели в числах подобия, для расчета процессов тепло- массопереноса при термообработке и сушке пищевых продуктов в перечисленных аппаратах. Дано описание машины роторного типа для разделения плодов косточковых культур. Обоснована экономическая эффективность предлагаемого направления первичной переработки косточковых культур. При обобщении экспериментальных результатов использовано модифицированное число Ньютона. Энергетические характеристики машины учтены при использовании числа Эйлера. Предложены критериальные уравнения для проектирования и оптимизации подобного класса машин. Предложенные конструкции аппаратов способны обеспечить эффективный теплоперенос при обработке вязких и дисперсных пищевых продуктов при уменьшении энергетических потерь до 30 %.

Keywords: thermomechanical processing, energy, food technology, fruit, models, rotating thermosyphon

Ключевые слова: термомеханическая обработка, энергия, пищевые технологии, плоды, модели, вращающийся термосифон

Введение. Оборудование, которое используется в пищевой промышленности для механической и термомеханической обработки пищевого сырья является одним из наиболее энергозатратных. Рассмотрены достоинства и недостатки оборудования для переработки плодов косточковых культур, термомеханического оборудования для сушки дисперсных продуктов, обработки неньютоновских жидкостей. В настоящее время существует два основных направления переработки плодов косточковых культур для разделения на полуфабрикат и отходы: без предварительной термообработки и с предварительной термообработкой. При тепловом способе обработки необходимо выделить следующие основные недостатки: тепловая обработка приводит к дополнительным потерям биологического потенциала сырья, что отрицательно сказывается на качестве продукта; имеют место потери тепловой энергии; эксплуатация и обслуживание тепловых аппаратов приводят к дополнительным расходам материальных средств.

Основными проблемами, возникающими при тепловой обработке пищевых неньютоновских жидкостей (ННЖ), являются: изменение качества продукта в зависимости от продолжительности теплового воздействия; процесс интенсивного накипеобразования. Для решения проблем термообработки пищевых ННЖ применяют термомеханические агрегаты (ТМА). Слабым элементом ТМА является узел подвода пара и отвода конденсата. Герметизация узла соединения вращающегося ротора, с неподвижным паропроводом и конденсатороводом является технически сложной задачей.

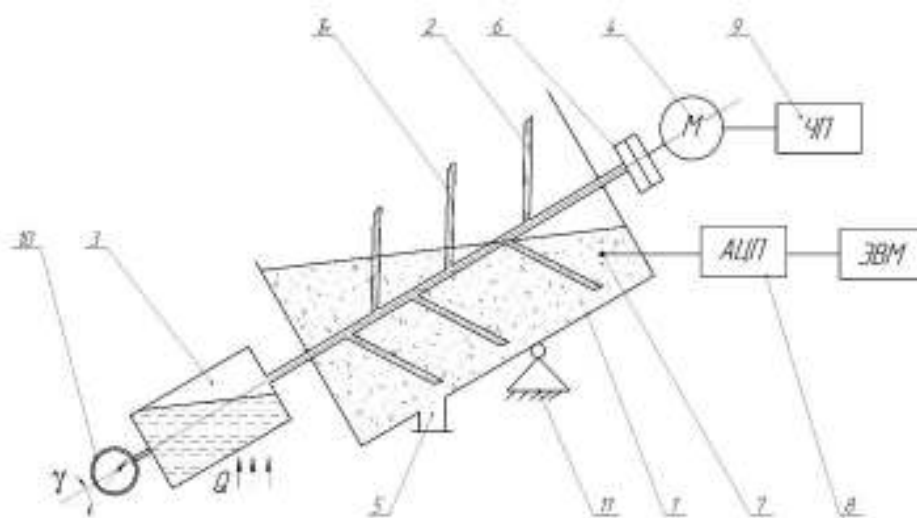
Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48 % случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства. Шахтные конвективные зерносушилки имеют ряд недостатков: невысокий КПД использования объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергозатраты (5 МДж/кг и выше). Поэтому при модернизации предприятий многие аграрии (до 15 %) собираются уделить внимание участкам сушки как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [1].

Гораздо реже (до 5%) на производствах используются сушилки, теплота в которых передается зерну от нагретой поверхности. В качестве нагретой поверхности могут использоваться трубы, обогреваемые изнутри паром или горячей водой. Паровые сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи к зерновому потоку 30...90 Вт/м² К [2]. Недостатки конструкций паровых сушилок: сложная аппаратурно-техническая реализация; необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата; образование водяных пробок в трубках; низкая степень перемешивания зернового потока. Решение упомянутых проблем при переработке плодов косточковых культур – применение обработки холодным способом (в свежем состоянии) на перфорированной поверхности в поле центробежных сил; проблем при термообработке, сушке дисперсных продуктов и ННЖ – использование аппаратов на базе термосифонов, вращающихся термосифонов (ВТС), тепловых труб.

Применение обработки плодов косточковых культур холодным способом позволяет процесс разделения выполнять в непрерывном режиме, получать полуфабрикат определенной степени измельчения и косточки без изменения их биологических свойств. Применение ТМА на базе ВТС в пищевой промышленности позволяет реализовать следующие пути снижения энергозатрат: сокращение цепочки трансформации энергии; совмещение в аппарате нескольких технологических процессов; интенсификация тепломассообмена; эффективная доставка энергии к продукту; утилизация теплоты. Воздействие на вязкий (дисперсный) продукт с помощью ВТС, способствует эффективному разрушению гидродинамического и теплового пограничных слоев, что приводит к увеличению интенсивности процессов переноса. Возможно выделить несколько основных направлений применения аппаратов на базе ВТС. Это теплообменники, выпарные установки, сушилки для дисперсных продуктов.

Методы исследования. Проведен ряд экспериментов по сушке дисперсных продуктов, термообработке ННЖ в аппарате с ВТС. Аппарат (рис. 1) состоит из корпуса 1, внутри которого размещен ротор 2, выполненный в виде вращающегося термосифона. Ротор 2 соединен с испарителем 3 и через муфту 6 с электродвигателем 4. Ротор 2 и испаритель 3 представляют собой герметически закрытую полость, частично заполненную теплоносителем. В нижней части корпуса 1 выполнен патрубок 5 для разгрузки продукта и шарнир 11 для регулирования угла наклона корпуса 1. Аппарат работает следующим образом. При подводе теплоты (Q) к испарителю 3 теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в ротор 2, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода продукту. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель 3. Происходит сушка, перемешивание, либо нагревание продукта, после чего продукт выгружается через нижний патрубок в корпусе. В процессе эксперимента изменяли угол наклона ВТС (γ), частоту вращения ВТС (n). Измерение температуры осуществляли через определенные промежутки времени при помощи термопар 7, помещенных в объем продукта (рис. 1).

Термопары подсоединяли к аналого-цифровому комплексу 8. Частота оборотов ВТС измерялась при помощи тахометра и регулировалась частотным преобразователем 9 типа. Во время экспериментов, давление P в испарителе и конденсаторе ВТС поддерживалось постоянным, таким образом поверхность конденсатора оставалась изотермичной. Давление паров теплоносителя в ВТС измеряли при помощи манометра 10.

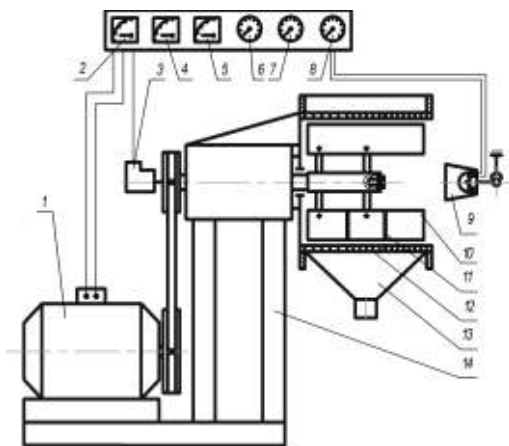


1 – корпус, 2 – ротор, выполненный в виде вращающегося термосифона, 3 – испаритель, 4 – электродвигатель, 5 – патрубок, 6 – муфта, 7 – термопара, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – частотный преобразователь, 10 – манометр, 11 – шарнир

Рис. 1. Конструкция аппарата с ВТС

В качестве объектов исследований были выбраны крупнозернистые дисперсные продукты: пшеница, вареный горох; мелкозернистые: просо, амарант; неньютоновские жидкости: томатная масса, яблочное пюре. Зерно пшеницы увлажняли до состояния сырого. Начальная влажность зерна пшеницы в опытах соответствует 22,5 %. Начальная влажность дисперсных продуктов поддерживалась на уровне

технологических требований. Конечная влажность продуктов обычно выбиралась из таблиц как равновесная для данных атмосферных условий. Температура поверхности конденсатора ВТС поддерживалась такой, чтобы не происходило перегрева продукта выше технологических требований. В связи с отсутствием информации о переработке косточковых плодов в свежем виде на перфорированной поверхности в поле центробежных сил, были выполнены экспериментальные исследования [3-5]. На первом этапе исследования проведены с одиночными плодами. Для этого разработана экспериментальная установка (рис. 2). Установка состоит из рамы 14, на которой установлены электродвигатель постоянного тока 1, подшипниковый узел, на выходном валу которого находится двухлопастной ротор 10. На одной из лопастей смонтировано гнездо 11. Угол опережения лопастей равен нулю. Установка комплектуется цилиндрическими перфорированными оболочками внутренним диаметром 125 мм, каждая из которых разделена в осевом направлении на три участка шириной 60 мм. В состав установки входит тахогенератор типа Д-2ММ, тахометр типа ТЗиЗМ класса точности 1,5% с целью регулирования частоты вращения ротора. Для визуального наблюдения за процессом установка была оснащена строболампой типа ИСШ-15. Последовательность выполнения экспериментов заключалась в следующем. Формировали партию плодов примерно одинаковых размеров, без механических повреждений. В случае необходимости удаляли плодоножки. После этого случайным образом, из партии извлекали отдельные плоды, определяли массу каждого плода, формируя, таким образом, их количество в зависимости от плана проведения эксперимента на каждом уровне. С помощью стробоскопа в холостом режиме устанавливали необходимую частоту вращения оборотов лопастей.



1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – амперметр; 3 – тахогенератор; 4 – вольтметр; 5 – ваттметр; 6 – тахометр; 7, 8 – приборы управления и регистрации частоты вспышек строболампы; 9 – строболампа; 10 – лопастной ротор; 11 – гнездо; 12 – перфорированная обечайка; 13 – сборник; 14 – рама

Рис. 2. Схема экспериментальной установки по переработке косточковых плодов

После этого электродвигатель выключали, устанавливали плод в гнездо, включали электродвигатель с одновременным включением секундомера. Фиксировали время переработки плода, после чего отключали электродвигатель с одновременной остановкой секундомера. Определяли остаточную массу мякоти с косточкой или массу чистой косточки. Разделив разницу исходной и остаточной масс плода на время его переработки, определяли интенсивность отделения мякоти от косточек.

Результаты исследований. Проведены эксперименты по выпариванию яблочного пюре в аппарате с ВТС. Концентрация при выпаривании яблочного пюре при частоте оборотов ВТС $n = 14$ об/мин, и угле наклона $\gamma = 30^\circ$ увеличивается, приближаясь к теоретической границе. Концентрация яблочного пюре увеличена с 7,3 до 18,4 % СВ. Период нагрева раствора до температуры кипения около 40 мин. Раствор кипит при атмосферном давлении. Наблюдается испарение влаги в период

нагрева раствора до температуры кипения. Скорость удаления влаги в период нагрева в 2 раза ниже, чем во время интенсивного кипения раствора.

Проведены эксперименты по сушке пшеницы в аппарате с ВТС. В процессе нагрева зерна происходит интенсивное парообразование на поверхности продукта, поэтому периода прогрева материала на кривой сушки не наблюдается. В первом периоде сушки скорость сушки изменяется в пределах 0,0072...0,0056 %/с, в зависимости от температуры материала. Продолжительность первого периода составляет около 1000 с. Далее скорость сушки падает примерно в три раза и составляет 0,0024...0,0017 %/с. Сушка идет в стесненных условиях – в плотном зерновом слое. Поэтому постоянно присутствует поверхностная влага, что характерно для периода постоянной скорости сушки [6-7]. Влияние на скорость сушки оказывает изменение температуры поверхности конденсатора ВТС.

Влажность зерна в серии опытов снижается в среднем на 10%, что соответствует стандартным зерносушилкам.

Проведены эксперименты по обработке плодов холодным способом. Степенной вид кривых характерен при использовании отверстий диаметром 2 и 4 мм. Это можно объяснить наличием двух этапов при отделении мякоти от косточек. На первом этапе происходит постепенное разрушение покровных тканей в результате циклического воздействия кромок отверстий при вращательном движении плодов. Второй этап характеризуется резким увеличением количества отделяемой мякоти в связи с разрушением покровной ткани на некотором участке поверхности плода.

Обобщение результатов. Вид критериальных уравнений для обобщения экспериментальных данных получен при использовании метода анализа размерностей.

При обобщении результатов по сушке дисперсных продуктов в аппарате с ВТС получено уравнение вида:

$$Nu_m = 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Re^{0.5} \cdot \left(\frac{T_n}{T_g}\right)^{0.4} \quad (1),$$

где:

Nu_m – число Нуссельта диффузионное;

Re – число Пекле тепловое;

$\left(\frac{T_n}{T_g}\right)$ – симплекс температур.

База экспериментальных данных по кинетике сушки пшеницы в сушилке с ВТС удовлетворительно обобщается критериальным уравнением. С погрешностью не более 15% уравнение (1) позволяет рассчитать коэффициент массоотдачи β в пределах $1,2 \times 10^3 \leq Re \leq 1,3 \times 10^4$, и параметрического комплекса $2,1 \leq \left(\frac{T_n}{T_g}\right) \leq 4$.

При обобщении результатов по обработке плодов холодным способом:

$$Ke = 2 \cdot 10^{-8} \cdot Ne^{2.17} \cdot \left(\frac{d_o}{d_i}\right)^{1.53} \quad (2),$$

где:

Ne – модифицированное число Ньютона;

Ke – число подобия, характеризует влияние параметров на эффективность процесса отделения мякоти от косточек;

$\left(\frac{d_o}{d_i}\right)$ – геометрический симплекс.

Уравнение (2) справедливо для диапазона числа Ньютона $500 \leq Ne \leq 5000$, отношение диаметров отверстий в диапазоне $1,00 \leq \left(\frac{d_o}{d_i}\right) \leq 0,20$ при переработке исследуемых плодов в пределах прочности

покровных тканей на прокол ($0,1 \leq \sigma \leq 0,4$) Н/мм² и средней плотности мякоти $\rho = 1020$ кг/м³.

Критериальное уравнение зависимости числа Эйлера от числа Ньютона при переработке абрикос холодным способом имеет вид:

$$Eu = 3 \cdot 10^6 \cdot Ne^{-1.02} \quad (3),$$

где:

Eu – число Эйлера;

Ne – модифицированное число Ньютона.

Модель термотрансформации энергии в консервном производстве. Исходя из результатов компьютерного моделирования, произведен расчет аппарата с ВТС для линии по производству яблочного повидла. Расчет произведен в два этапа. Первый – включает в себя оценку энергетической эффективности применения схемы с ВТС в линии по производству яблочного повидла. Второй – оценку

степени интенсификации процесса термообработки. Причины потери энергии при её трансформации, транспортировке и использовании можно установить, если выработать общий принцип исследования структуры составляющих этих потерь. Представляется, что таким принципом может быть модель термотрансформации энергии. Тогда на любом уровне модели можно установить степень влияния составляющих теплового баланса на энергетическую эффективность работы предложенной схемы.

Модель термотрансформации энергии (рис. 3) иллюстрирует энергетическую эффективность применения базовой схемы по производству яблочного пюре и схемы с ВТС.

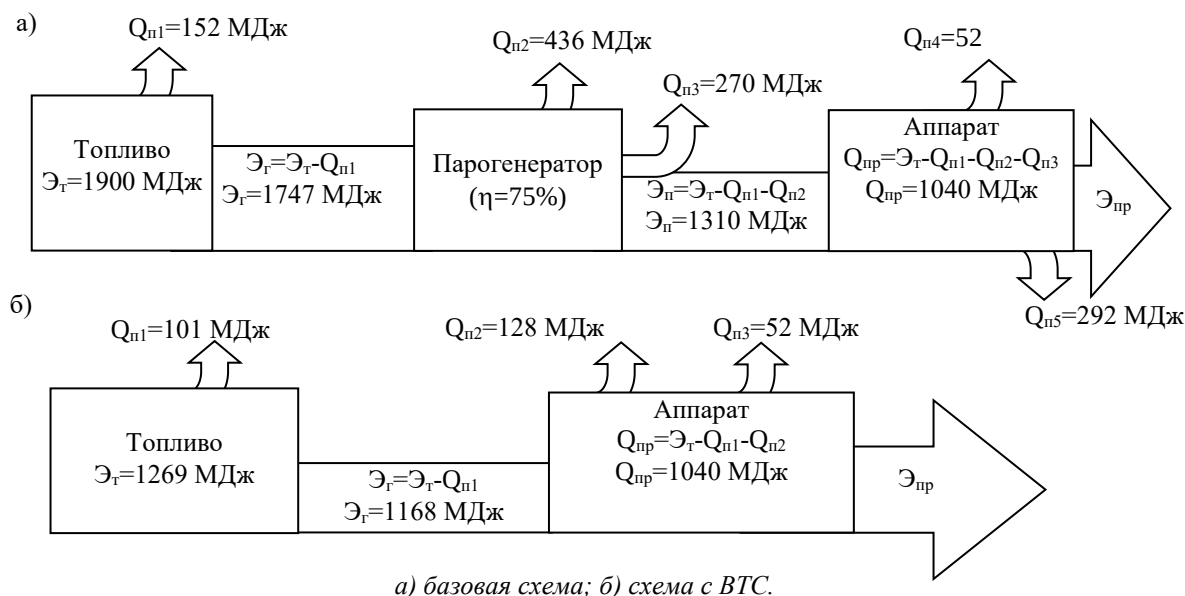


Рис. 3. Модель трансформации, транспортировки, потерь энергии

Показано, как энергия топлива трансформируется в продукт, модель учитывает возможные потери энергии. При применении схемы с ВТС в консервном производстве, энергия топлива трансформируется в энергию водяного пара. Пар транспортируется к аппарату. При этом возникают потери при: сжигании топлива ($Q_{п1}=152$ МДж), в парогенераторе ($Q_{п2}=436$ МДж), при транспортировке пара к аппарату ($Q_{п3}=270$ МДж), от стенок аппарата ($Q_{п4}=52$ МДж), с уходящим конденсатом ($Q_{п5}=292$ МДж).

Применяя схему с ВТС возможно избежать потерь при транспортировке пара к аппарату и с уходящим конденсатом. Таким образом, возможно уменьшить расход топлива с 47,5 кг до 31,7 кг а также уменьшить удельные энергозатраты с 3,8 МДж/кг до 2,5 МДж/кг.

Выводы. Установлено, что на интенсивность теплопереноса при обработке ННЖ в аппарате с ВТС существенно влияет частота вращения конденсатора, угол его наклона и физические свойства продукта. С повышением вязкости продукта эффективность аппаратов с ВТС (по сравнению с традиционными) возрастает. Установлено, что аппарат с ВТС обеспечивает коэффициенты теплопередачи, при обработке пищевых ННЖ с вязкостью от 0,8 до 1,5 Па·с, в диапазоне 500...2600 Вт/м²·К.

Установлено, что при выпаривании яблочного пюре в аппарате с ВТС, увеличение частоты вращения конденсатора в 7 раз приводит к повышению содержания сухих веществ до 33 %, а коэффициента теплоотдачи в 4,4 раза. При обработке томатной массы повышение частоты вращения конденсатора в 7 раз приводит к повышению содержания сухих веществ в 1,7 раз. Увеличение угла наклона ВТС с 30° до 45° приводит к повышению содержания сухих веществ в продукте до 36%, а коэффициента теплоотдачи в 1,3 раза.

Существенное влияние на коэффициент массоотдачи при сушке дисперсных продуктов имеет частота вращения и температура поверхности ВТС. Рост скорости вращения ВТС в 2 раза приводит к повышению коэффициента массоотдачи на 40%, повышение температуры поверхности термосифона на 10 °С приводит к росту коэффициента массоотдачи β на 8%.

Предложенные конструкции аппаратов с ВТС способны обеспечить эффективный теплоперенос при обработке вязких и дисперсных пищевых продуктов при уменьшении энергетических потерь до 30 %.

Литература

1. Bezbah I. V. Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs / Bezbah I. V., Burdo O. G. // Applied Thermal Engineering 28/2008, p. 341-343.
2. Бурдо О. Г., Смирнов Г. Ф., Терзиев С. Г., Зыков А. В. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб - Одесса: ТОВ «ІНВАЦ», 2014 – 376 с.
3. Siddiqui M W, Chakraborty I, Ayala-Zavala JF, Dhua RS. Advances in minimal processing of fruits and vegetables: a review. J Sci Ind Res India. 2011;70:823–34.
4. Watson RR, Preedy VR, Zibadi S. Polyphenols in human health and disease. San Diego, CA, USA: Academic Press, Elsevier; 2014.
5. Jakobek L, Šeru ga M, Novak I, Medvidović-Kosanović M. Flavonols, phenolic acids and antioxidant activity of some red fruits. Deut Lebensm-Rundsch. 2007;103:369–78.
6. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
7. Бурдо О. Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244 с.

References

1. Burdo, O. G., Bezbah, I. V. (2008) Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs. Applied Thermal Engineering 28, 341-343.
2. Burdo, O.G., Smirnov, G.F., Terziev, S.G., Zyikov, A.V. (2014) Innovatsionnyie teplotehnologii APK na osnove teplovyih trub. Odessa: «INVATs», 376.
3. Siddiqui, M. W., Chakraborty, I, Ayala-Zavala, JF., Dhua, RS (2011) Advances in minimal processing of fruits and vegetables: a review. India.; 70:823–34.
4. Watson, RR, Preedy, VR, Zibadi, S. (2013) Polyphenols in human health and disease. Elsevier, 1488
5. Jakobek, L, Šeru ga, M, Novak, I, Medvidović-Kosanović, M. (2007) Flavonols, phenolic acids and antioxidant activity of some red fruits. Deut Lebensm-Rundsch, 103:369–78.
6. Burdo O.G. (2010) Evolyutsiya sushilnyih ustanovok. Odessa: Poligraf, 368.
7. Burdo O.G. (2008) Energeticheskiy monitoring pischevyih proizvodstv. Odessa: Poligraf, 244.

УДК 66.061.3

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ- АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ

Недбайло А.Є., к.т.н.,

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

A REVIEW OF EXTRACTION METHODS FOR RETRIEVAL BIOLOGICAL-ACTIVE COMPOUNDS FROM NATURAL RAW MATERIALS

Institute of Thermalphysics of NAS of Ukraine, Kyiv

***Аннотация.** В современной пищевой, фармацевтической, косметической и химической промышленности растет спрос на использование биологически активных компонентов природного сырья. Для современных производств актуальными являются проблемы выбора или оптимизации технологической базы производства экстрактов. В частности, насущными становятся вопросы улучшения качества экстрактов, интенсификации процессов, уменьшения времени и трудозатрат при производстве, его автоматизации. Данный обзор касается описания и сравнения наиболее используемых методов получения экстрактов, их принципов, достоинств и недостатков, и необходим для оценки целесообразности применения методов с практической и экономической точек зрения. В обзоре много внимания уделено новым зарубежным и отечественным разработкам. На ряду с классическими методами экстракции представлены такие современные методы, как экстракция в условиях*

микроволнового поля, сверхкритическая жидкостная экстракция, ускоренная экстракция растворителями (жидкостная экстракция под давлением), сверхкритическая жидкостная экстракция, ультразвуковая экстракция, экстракция под воздействием гидродинамической кавитации.

Abstract. In the modern food, pharmaceutical, cosmetic and chemical industries, there is a growing demand for the use of biologically active compounds of natural raw materials. For modern industry, the choice or optimization of the technological base for the production of extracts is topical. In particular, the issues of improving the quality of extracts, the intensification of the process, the reduction of time and labor inputs in production, and its automation become urgent. In particular, the issues of improving the quality of extracts, the intensification of the process, the reduction of time and labor inputs in production, and its automation become urgent. This review deals with the description and comparison of the most used methods for extracting, their principles, advantages and disadvantages, and is necessary for assessing the feasibility of applying methods from a practical and economic point of view. The review pays much attention to new foreign and domestic developments. In addition to classical extraction methods, more modern ones are presented, such as microwave extraction, supercritical fluid extraction, accelerated solvent extraction (liquid extraction under pressure), supercritical fluid extraction, ultrasonic extraction, hydrodynamic cavitation extraction.

Ключевые слова: экстракция, биологически- активные вещества, массообмен.

Экстракция – это процесс извлечения целевого компонента из раствора или сухой субстанции с помощью растворителя. На полноту и скорость экстракции влияют такие факторы, как: размер частиц сырья, температура и продолжительность процесса, соотношение между количеством сырья и экстрагента и ряд других факторов. Выбор метода экстракции определяется типом экстрагента, гидромодулем, физико-химическими свойствами биологически-активного вещества (БАВ), однако, решающий фактор – природа БАВ и состав извлекаемых веществ.

Наиболее распространенными классическими методами экстракции являются мацерация, перколяция, экстракция Сокслета. Мацерация основана на замачивании экстрагентом сырья (цельного или измельченного) и выдерживании не менее 3-х суток при периодическом перемешивании, что приводит к размягчению, деструкции клеточной стенки и последующему высвобождению растворимых веществ. Процесс может проходить при дополнительном нагреве, а выбор экстрагента осуществляется согласно типу целевого вещества. Несмотря на простоту и дешевизну метода, он обладает рядом недостатков. При мацерации действующие вещества извлекаются не полностью (менее 90%); процесс продолжителен по времени, т.к. скорость диффузионного процесса невелика; в экстракте завышено содержание балластных веществ; трудоемкость процесса (двойное прессование, промывка шрота); значительные потери при диффузии и испарении экстрагента. Развитием мацерации стали бисмацерация и ремацерация, предполагающие периодическое обновление экстрагента, в результате чего наблюдается более полное извлечение целевого компонента [1].

Широко используется для экстракции растительного сырья метод перколяции – непрерывной фильтрации или процеживания экстрагента сквозь слой сырья. При перколяции используется специальное оборудование, называемое перколятором [2]. Сухие порошкообразные образцы упаковывают в кассету перколятора, заливают водой и мацерируют в течение нескольких часов. Процесс перколяции обычно проводят с умеренной скоростью до тех пор, пока экстракция не завершится, вплоть до испарения, для получения концентрированных экстрактов. Разработчики современного оборудования для перколяции стараются интенсифицировать массообмен в перколяторе созданием определенных термогидродинамических режимов. В работе [3] описано оборудование для экстракции методом перколяции с возможностью реализации пульсаций в перколяторе, что способствует равномерному прохождению экстрагента через слой сырья, а в работе [4] организовано знакопеременное движение экстрагента через кассету с сырьем. При этом течение жидкости остается ламинарным, так что разрушение растительного сырья не допускается, а получаемый экстракт не требует дополнительной сепарации. К достоинствам данного метода экстракции можно отнести уменьшение временных затрат на экстракцию по сравнению с мацерацией, практически полное извлечение целевого компонента. Однако, при этом экстракт получается разбавленным и требует дополнительных затрат на концентрирование.

Экстракция Сокслета является одним из широко используемых методов экстракции и проходит в одноименном аппарате. Для извлечения индивидуального вещества из сухих продуктов в лабораториях широко применяется непрерывная экстракция по Сокслету. Несмотря на эффективность и популярность данного метода, он имеет ряд ограничений и не может применяться для экстракции термолabile компонентов, т.к. экстракция обычно происходит при температуре кипения растворителя в течение

длительного времени. Данная проблема может решаться использованием летучих органических растворителей с низкой температурой кипения (эфир, хлороформ, метилен хлористый или их смеси). Однако нельзя игнорировать способность некоторых БАВ (например, флавоноидов) расщепляться при воздействии органических веществ [1, 5].

В промышленности используются ряд новых и более эффективных методов экстракции по сравнению с выше описанными классическими методами. К ним относятся экстракция в условиях микроволнового поля, сверхкритическая жидкостная экстракция, ускоренная экстракция растворителями (жидкостная экстракция под давлением), сверхкритическая жидкостная экстракция, ультразвуковая экстракция.

При экстракции в микроволновом поле используется энергия электрического поля, приводящая к дипольному вращению молекул, их столкновению и высвобождению тепловой энергии. Дипольное вращение молекул, индуцированное микроволновым электромагнитным полем, связано с разрывом водородных связей, что усиливает миграцию растворенных ионов и способствует прониканию растворителя в сырье. Использование данного метода экстракции позволяет сократить время процесса и увеличить концентрацию экстракта по сравнению с классическими методами экстракции, однако нужно учитывать, что экстракция в микроволновом поле может привести к термической деструкции отдельных БАВ, таких как танины и антоцианы [6].

Ускоренная экстракция растворителем протекает при высоких температурах (50...200°C), а жидкое состояние растворителя обеспечивается высокими давлениями (10...15 МПа). Данные теплофизические параметры обеспечивают высокую кинетику процесса: ускоряют проникание растворителя в клетку и увеличивают диффузию растворителя. Данный метод обеспечивает относительно быстрое извлечение компонентов при небольшом количестве растворителя. Однако, для термолабильных компонентов данный метод экстракции не приемлем [1].

Субкритическая водная экстракция обеспечивает высокую эффективность извлечения целевых компонентов за счет изменения физико-химических свойств воды при высоких температурах и давлениях. Реализация процесса проходит при температурах 100...374°C. Значения давления выбираются достаточными, чтобы обеспечить жидкое состояние воды. По мере повышения температуры процесса наблюдается снижение диэлектрической проницаемости, увеличение скорости диффузии, уменьшение вязкости и поверхностного натяжения. Полярные целевые компоненты извлекаются при низких температурных режимах, тогда как извлечение неполярных компонентов обеспечивается более высокими температурами. По сравнению с конвекционными методами экстракции, экстракция субкритической водой экономически выгодна, экологична, а процесс проходит быстрее [7].

Сверхкритическая экстракция. Одним из перспективных направлений энергосберегающих и минимизирующих отходы технологий является использование газов в сверхкритическом состоянии в качестве экстрагентов БАВ из растительного сырья. При данном методе экстракции температура и давление экстрагента превышает критические значения. Принцип технологии экстрагирования сверхкритическими газами состоит в следующем: газ в сверхкритическом состоянии чрезвычайно легко промывает слой растительного сырья, выделяя из него соответствующие экстрактивные вещества. После прохождения сверхкритического газа вместе с экстрагированными веществами дроссельного вентиля происходит снижение давления, что приводит к потере растворяющей способности газа и интенсивному испарению газа из экстракта. Очищенный газ снова сжимается при помощи компрессоров и используется для дальнейшей экстракции. При данном способе экстракции достигается высокие показатели массобмена, снижаются энергозатраты на экстракцию по сравнению с классическими методами, использование CO₂ обеспечивает высокую селективность процесса и экологичность. Безусловно, данный метод экстракции является одним из самых перспективных, однако обладает рядом недостатков: высокие капитальные затраты на оборудование, сложность организации непрерывной обработки, сложности при извлечении более полярных растворителей [8, 9].

Перспективным является использование процесса гидродинамической кавитации для процессов экстракции. [10]. Реализация данного процесса проходит в специальных устройствах – гидродинамических кавитаторах, конструкции которых существенно отличаются друг от друга, и общим для них является резкое изменение давления, обеспечивающие условия для создания кавитации. Наиболее часто используемые аппараты для экстракции – роторно-пульсационные аппараты, труба Вентури. Новой разработкой стал пульсационный аппарат ударного типа, в котором гидродинамическая кавитация реализуется за счет мгновенного перекрытия отверстия рабочей камеры, и ведет к возникновению кавитационных эффектов в потоке жидкости [11]. Данный способ экстракции показал

свою эффективность, как при экстрагировании растительного сырья (шиповника, валерианы), так и при извлечении гуминовой кислоты из торфа. Интенсификация массообменного процесса возможна за счет следующих механизмов. Происходит механическое разрушение сырья, в том числе и на клеточном уровне, что способствует увеличению массообменной поверхности и более полному извлечению целевого компонента. Также нужно учитывать, что при схлопывании кавитационных пузырьков, в нем и прилегающей области достигаются закритические значения температур и давлений в течении нескольких наносекунд. При таких значениях вода существенно увеличивает растворяющую способность. Временной масштаб процесса обеспечивает извлечение целевого компонента, без их термической деструкции, поэтому подходит для экстрагирования термочувствительных фармацевтических компонентов.

Ультразвуковая экстракция является также эффективным методом извлечения ценных соединений из растительных материалов [12]. Он подходит для лабораторий и малых производств. Экстракция проходит под воздействием кавитации, за счет создания звуковых волн в жидкости, что обеспечивает лучшее проникание экстрагента в клетки растительного сырья и улучшает высвобождение химических соединений. Растительное сырье, в котором целевые компоненты локализованы на поверхности могут подвергаться ультразвуковой обработке при низких частотах. Для извлечения целевого компонента из внутренних слоев сырья используется ультразвук большей интенсивности, что ведет к разрушению частиц и увеличению поверхности массообмена, и обеспечивает достижение быстрой и полной экстракции.

Выводы. Описанные в этом обзоре методы экстракции имеют свои преимущества и ограничения. Использование современных технологий открывает новые возможности для производства и требует решения задачи усовершенствования технологической базы ведения процесса экстракции, проведения дальнейших исследований для более глубокого понимания механизмов процесса извлечения целевых компонентов, в том числе и нанопроцессов, а также усовершенствования аппаратного оформления процессов.

Литература

1. Khaled A. Shams, Nahla S. Abdel-Azim, Ibrahim A. Saleh, Mohamed-Elamir F. Hegazy, Mostafa M. El-Missiry and Faiza M. Hammouda. Green technology: Economically and environmentally innovative methods for extraction of medicinal & aromatic plants (MAP) in Egypt. J. Chem. Pharm. Res., 2015, 7(5). p.1050-1074.
2. Букеева, А.Б. Обзор современных методов выделения биоактивных веществ из растений / А.Б. Букеева, С.Ж. Кудайбергенова // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2013, №2, с.192-197.
3. Васильев Д.С. Интенсификация процесса экстракции биологически-активных веществ из растительного сырья и создание термодифузионного оборудования. Промышленная теплотехника, 2004, т. 26, №6, с. 15 – 19.
4. Л.Н. Грабов, Д.В. Посулько. Интенсификация тепломассообменных процессов получения галеновых препаратов. Наукові праці ОНАХТ випуск 45, Т.3 с. 66-69.
5. Леонова, М.В. Экстракционные методы изготовления лекарственных средств из растительного сырья : учебно-методическое пособие./ М.В. Леонова, Ю.Н. Климовкин - Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2012. - 118 с.
6. Farid Chemat, Giancarlo Cravotto. Microwaveassisted Extraction For Bioactive Compound. Theory and Practice. Springer Science+Business Media New York 2013. – 238 p.
7. Платонов И.А., Никитченко Н.В., Онучак Л.А., Арутюнов Ю.И., Куркин В.А., Смирнов П.В. Экстракция субкритической водой биологически-активных соединений из плодов расторопши пятнистой. Сверхкритические флюиды: Теория и практика. Т. 5., №2, – 2010. с. 67 – 75.
8. В. Могилук, А. Добровольный. Сверхкритическая флюидная экстракция растительного сырья: перспективная технологическая платформа для фармацевтической промышленности. Фармацевтическая отрасль, февраль № 1 (48) 2015, с. 62 – 68.
9. Azwanida N.N. A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. Medicinal & Aromatic Plants. Vol. 4 • Issue 3. 2015.
10. Витенько Т. Н. Экстрагирование из капиллярно-пористых тел с использованием предварительной кавитационной обработки экстрагента/Т. М. Витенько // Энерготехнологии и ресурсосбережение.- 2008. - №5.- с. 77-79.
11. Інтенсифікація тепломассообмінних та гідродинамічних процесів при екстрагуванні рослинної сировини із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії. Автореферат на здобуття ступеня кандидата технічних наук. Київ 2016. –25С.
12. M. G. Cares, Y. Vargas, L. Gaete, J. Sainz, J. Alarcón. Ultrasonically assisted Extraction of bioactive principles from Quillaja Saponaria Molina. Physics Procedia 3 (2010). P. 169–178.

УДК: 628.161.065.5.084:544.4

КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Тришин Ф. А. канд. техн. наук, доцент,

Терзиев С. Г. канд. техн. наук, доцент,

Орловская Ю. В. аспирант

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

THE KINETICS OF ICE FORMATION IN THE ULTRASONIC FIELD

Trishin F. A., Terziev S. G., Orlovskaya J. V.

Odessa national academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Аннотация. *Анализируются проблемы дефицита питьевой воды. Рассматриваются различные методы улучшения качества воды. Показаны перспективы низкотемпературных технологий водоподготовки. Приведены энергетические и конструктивные преимущества вымораживающих установок блочного типа. Подтверждено превосходство блочного вымораживания с применением ультразвука над другими методами очистки воды.*

Abstract. The problems of shortage of drinking water are being analyzed. Various methods for improving water quality are being considered. The prospects of the low-temperature water treatment technologies were shown. The energy and design advantages of freezing installations block type were shown. The superiority of the block freezing using ultrasound over other water treatment methods were confirmed.

Ключевые слова: водоподготовка, блочное вымораживание, акустическая энергия, интенсификация.

Keywords: water treatment technologies, block freezing, acoustic energy, intensification.

Введение. Высококачественная питьевая вода в количестве, удовлетворяющем основные потребности человека, является одним из условий укрепления здоровья людей и устойчивого развития государства в целом. Несоблюдение стандарта качества питьевой воды, приведёт к неблагоприятным как краткосрочным, так и долгосрочным последствиям для здоровья и благополучия населения. Уже сегодня наблюдается сокращение запасов питьевой воды в результате существенного увеличения количества населения за счет роста рождаемости в развивающихся странах и увеличения продолжительности жизни в развитых.

В целом же, за последние 200 лет количество людей на планете возросло более чем в 7 раз – с 1 млрд. в 1820 году до 7,2 млрд. в 2015 году. Естественно, пропорционально увеличились расходы воды, которая необходима не только для питьевых нужд, а и для производства энергии, пищи, одежды и т. д. По данным ООН, к 2030 году численность людей увеличится до 8 млрд., а потребность населения в воде увеличится еще на 30%, в энергии – на 45% и на 50% в еде. При этом запасы воды на планете не изменились и не изменятся, сокращается только доля доступной для использования и пригодной для питья воды.

Сегодня практически 2 млрд. людей в более чем 80 странах имеют ограниченное обеспечение питьевой водой. Ожидается, что к 2025 году эта цифра возрастет до 3 млрд. Украина, несмотря на большое количество рек, относится к одному из самых маловодных регионов Европы. По данным Украинского государственного научно-исследовательского института “УкрВОДГЕО”, 69% всей питьевой воды, которая поставляется в дома украинцев, не соответствует установленным санитарным нормам. В Украине наблюдается неравномерное распределение питьевой воды по регионам, а так-же в городской и сельской местности. В крупных городах (Одесса, Донецк, Харьков) на одного человека приходится в среднем 400 литров в сутки, при среднем значении по Украине - 250 литров. В сельской местности – 35-40 литров. Не все области Украины имеют одинаковое качество питьевой воды. Качество воды большинства областей по химическому и бактериальному составу классифицируется как загрязненная и грязная (IV-V класс качества).

Лишь треть от общего объема воды, используемого отечественными коммунальными хозяйствами, украинцы могут потреблять без дополнительной очистки. Так что эта вода, по сути, условно пригодна для питья. Таким образом, качество питьевой воды – критический фактор жизнедеятельности человека.

Согласно данным ВОЗ, ежегодно около 25% населения Земли подвергается риску заболеваний из-за употребления некачественной питьевой воды. Некачественная вода является одной из причин того, что в последние годы в Украине наблюдается распространение таких заболеваний, как язвенная болезнь желудка, желчнокаменная болезнь, болезни органов дыхания, стенокардия, инфаркт миокарда, холецистит.

Сложившаяся ситуация стимулирует бурное развитие актуального научно – технического направления - водоподготовки.

Методы улучшения качества воды. Из специальных способов водоочистки наиболее часто применяют обессоливание воды (снижение общей минерализации воды). К настоящему времени в мировой практике определились следующие основные методы обессоливания (опреснения) воды: дистилляция, ионный обмен, электродиализ (электролиз), вымораживание, гелиоопреснение и обратный осмос (гиперфильтрация). Многообразие методов объясняется тем, что ни один из них не может считаться универсальным, приемлемым для любых конкретных местных условий.

Развитие техники вымораживающих опреснительных установок. Среди холодильных методов опреснения воды перспективными считаются технологии блочного вымораживания. Впервые такие технологии были предложены в ОНАПТ на кафедре процессов и аппаратов еще в 1987г. Их эффективность подтверждена в работе одного из авторов [5]. Достоинством таких установок являются: простота конструкции, надежность, отсутствие системных потерь холода. Дальнейшие исследования способствовали формированию научных основ водоподготовки вымораживанием [6-7], что дало определенный импульс к развитию техники опреснения. Результаты совершенствования техники блочного вымораживания [8] определили энергетическую перспективность схем с рециклингом льда и целесообразность применения акустических полей в процессах формирования блоков льда. В настоящей работе базовыми являются именно такие схемы.

Кроме того, анализируются перспективные, с точки зрения авторов, принципиально новые технологии термического разделения растворов: в условиях вакуума и оригинальных систем подвода энергии. Применяются технологии адресной, селективной подачи энергии с помощью микроволновых систем и с помощью испарительно-конденсационных камер. Дистилляция при пониженных температурах должна иметь энергетические преимущества и благоприятно отразиться на качестве процесса разделения.

Принципы, которые реализуются в рассмотренных схемах, решают достаточно сложную проблему - предотвращение образования накипи на теплообменных поверхностях опреснителей.

Экспериментальные стенды. Физические принципы, которые лежат в основе деминерализации соленой воды вымораживанием, обуславливают ряд его неоспоримых преимуществ. Во-первых, количество энергии, которое необходимо для получения 1 кг пресной воды при вымораживании в 7 раз меньше, чем при термических методах (дистилляции, либо выпарки). Во-вторых, деминерализация вымораживанием нечувствительна к минеральному составу исходной воды. В-третьих, показатель качества пресной воды по сухому остатку (меньше 1кг солей на 1м³ воды) может быть достигнут во всех случаях. Холодильные способы обладают меньшей коррозией, меньшими капитальными затратами, более высокой термодинамической эффективностью. У них отсутствует накипеобразование. По сравнению с мембранными опреснителями, холодильные характеризуются большей степенью извлечения пресной воды, они нечувствительны к составу и концентрации примесей, не требуют тщательной предварительной очистки воды.

При обосновании выбора метода опреснения воды в конечном итоге решающее значение имеют экономические показатели. На топливную составляющую падает (45...68)% стоимости опреснения воды дистилляцией и (30...43)% - вымораживанием. Причем, с увеличением единичной мощности опреснителя составляющие затрат на обслуживание и амортизацию быстро падают, а доля энергетических затрат возрастает, поскольку удельный расход энергии с увеличением мощности установки снижается очень медленно.

Процесс опреснения соленой воды вымораживанием основан на селективных свойствах кристаллической решетки льда, которая не допускает замены атомов Н⁺ или О⁻ атомами других солей. В процессе медленного охлаждения раствора подвижность молекул воды и солей уменьшается, а упорядоченность увеличивается, приближаясь к строению элементарной кристаллической решетки льда.

Благодаря разным значениям свободных энергий у молекул воды в решетке льда и молекул солей в их решетках, происходит отделение от льда ионов солей, которые оттесняются от поверхности кристалла льда.

Основы применения ультразвука. Акустические волны, чьи частоты выше, чем верхний лимит, слышимый человеком, обычно около 16-20 КГц, называются ультразвуком. Эти волны часто классифицируются в зависимости от их частоты или мощности. Между 20 и 100 кГц, волны определяются как "низкой частоты ультразвук" и "мощный ультразвук". В самом деле, он обычно передается на высоком уровне мощности (несколько десятков ватт) и, следовательно, ультразвук способен модифицировать среду, где он распространяется. Мощный ультразвук может нарушить массу жидкости для создания кавитации или акустического течения - два явления с мощными макроскопическими эффектами для улучшения теплообмена. Поэтому мощный ультразвук находит применение в различных процессах, таких как очистка, сварка пластмасс, sono-химия и так далее. Кроме того, обычно используется для интенсификации тепло- и массообмена.

Акустическая кавитация является основным явлением, которое может возникнуть в результате распространения ультразвуковых волн в жидкости.

В основе многих применений ультразвука лежит акустическая кавитация, которая обеспечивает образование, рост и распад микропузырьков в пределах водного раствора, полученных от давления колебаний, которые происходят в прикладном звуковом поле.

Явление разрушающегося пузыря представляет собой микроскопический взрыв, что порождает высокую локальную турбулентность и выделение тепловой энергии. Следствием этого является значительное повышение температуры и давления до нескольких тысяч градусов Кельвина и несколько сотен бар. Эти эффекты могут быть использованы в огромном множестве полезных применений. Так как температуры вблизи разрушаемого пузыря повышены, "горячие точки" могут быть использованы для повышения скорости химической реакции некоторых процессов, в связи с увеличением теплоты и образованием свободных радикалов. Сильные возмущения давления, полученного в результате от выбросов ударной волны, приводят к механическим эффектам, таким как смешивание и сдвиг, которые в химической реакции могут служить для увеличения столкновений между реагентами, ускорять растворение или способствовать обновлению на поверхности твердого реагента. Примеры значимых применений акустической кавитации, разработанные для коммерческого использования, включают очистку сточных вод, продуктов питания, обработку напитков и образование белковых микропузырьков, которые могут быть использованы для транспортировки лекарственных средств.

В зависимости от частоты ультразвука, его влияние на жидкость может привести к следующим эффектам (рис.2):

1. Прогрессивный нагрев с помощью рассеивания акустической энергии;
2. Формирование, рост и разрушение паровых или газовых пузырьков;
3. Глобальный поток жидкости и возможное формирование конвективных ячеек;
4. Акустический фонтан (только при ультразвуке высокой частоты).

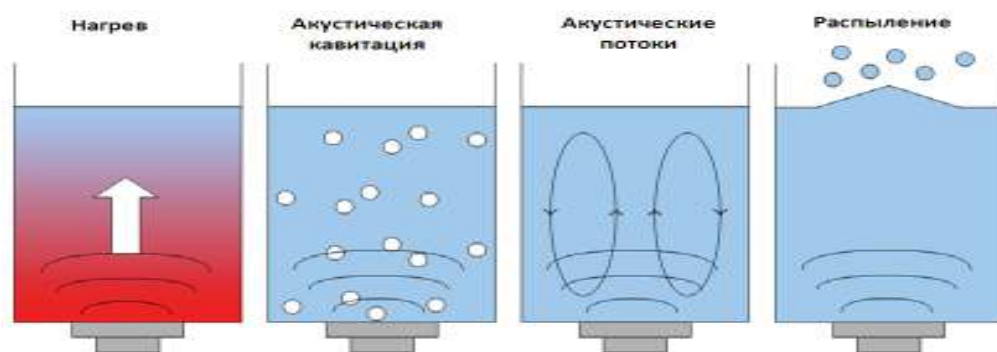


Рис.1. - Четыре эффекта, полученные в результате распространения ультразвука в жидкости.

Физике процесса опреснения вымораживанием удачно соответствуют установки блочного типа (рис.2).

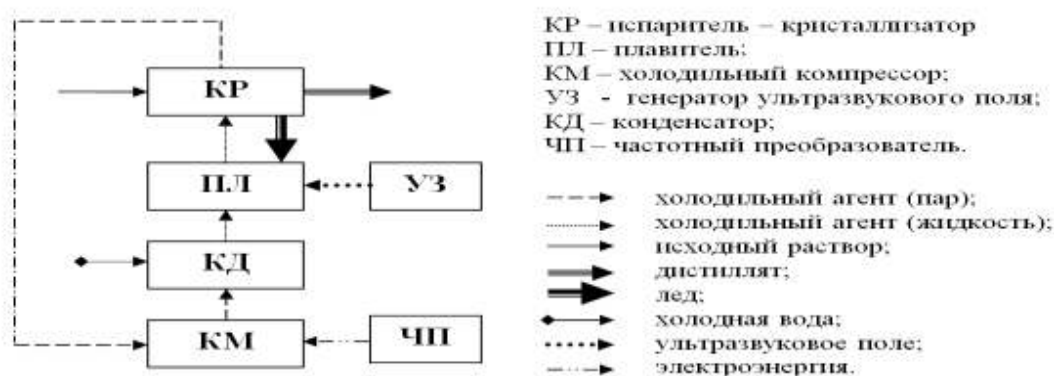


Рис.2. - Аппаратурно - процессовая схема установки блочного вымораживания.

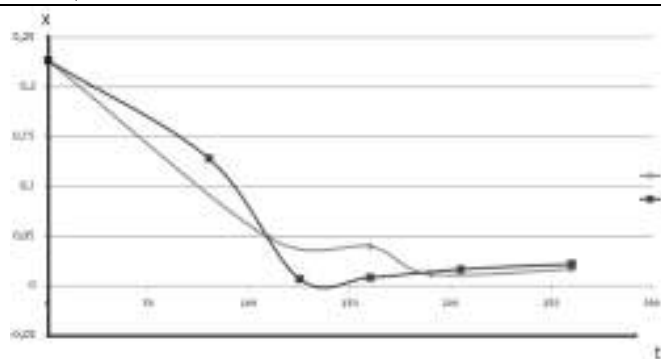
Схема работы выглядит следующим образом. Из раствора на кристаллизаторах формируется блок кристаллов льда, после чего оставшийся раствор удаляется из концентратора. Образовавшийся блок льда отделяется от кристаллизатора и осуществляется гравитационное сепарирование. Непродолжительная оттайка сопровождается плавлением тонкого поверхностного слоя блока, образовавшаяся при этом вода смывает раствор соли из капиллярных объемов и с поверхности блока. Далее производится расплав льда и получение очищенной воды. Теплота плавления льда используется в холодильном цикле для снижения температуры холодильного агента перед дросселированием. Таким образом, можно обеспечить непрерывный процесс опреснения, процесс легко механизировать, им просто управлять. В качестве охлаждающей среды можно использовать холодильный агент, хладоноситель, в частности, холодный воздух из окружающей среды.

Исходные входные потоки (рис.2) соответствуют параметрам водопроводной воды. На выходе задается допустимая концентрация солей в дистилляте.

Технической идеей схемы есть использование рециклинга льда и частотного преобразователя для регулирования холодильной производительности машины. Вопрос в том, что система должна эффективно работать как в первом цикле (при запуске установки при отсутствии льда в плавителе), так и в последующих циклах, когда происходит плавление льда. Возврат энергии льда в холодильный цикл может существенно снизить затраты энергии. Но для этого необходимо изменить характеристики компрессора, что предлагается осуществлять с помощью частотного преобразователя. Уменьшение холодильной мощности с помощью регулирующего вентиля является простым и удобным способом, но с энергетической точки зрения этот принцип не эффективен. Использование в схеме частотного преобразователя является более дорогим решением, но позволяет плавно перестраивать холодильную машину на необходимую мощность при максимальной энергетической эффективности. Особенно важно иметь такую возможность в рассматриваемой схеме с рециклингом льда, где следует реагировать на тепловые режимы плавителя.

Предполагается организация локального воздействия ультразвуковым генератором на поверхность фазового контакта «лед-вода», что позволит осуществлять формирование блока льда с плотной упаковкой кристаллов, а на стадии сепарирования - более эффективную эвакуацию растворов из пористого объема блока льда. То есть мы намораживаем блок льда в блочной вымораживающей установке. При замораживании на поверхности блока образуется так называемый «пограничный слой», который для интенсификации процесса нам необходимо разрушить. Блок льда - это своеобразная система с порами (капиллярами), а при воздействии ультразвука молекулы незамерзшего раствора с находящимися в нем солями расшатываются и облегчается их выход из пористой структуры блока. Что дает возможность значительно сократить время сепарирования.

Результаты исследований. С помощью блочной вымораживающей установки с ультразвуковым генератором процессов интенсификации и сепарирования был получен ряд опытов, результаты которых представлены на рисунках:



1 – без ультразвука,
2 – с применением ультразвука.

Рис.3. - Зависимость количества соли в объеме раствора от времени.

Для достижения наибольшего эффекта был применен генератор с переменной частотой и разной мощностью (рис.4, 5). Так же проводилась тарировка прибора с применением разной мощности при частоте 6 кГц, 10 и 20 кГц. Был установлен оптимальный прирост температуры при влиянии ультразвука частотой 20 кГц. При более высокой частоте температура воды повышается до более высокой, что не является оптимальным для нашей задачи.

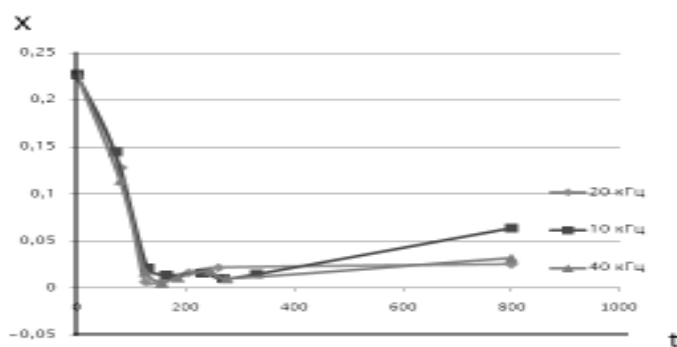


Рис.4. - Зависимость количества соли в объеме раствора от времени с применением ультразвука разной частоты.

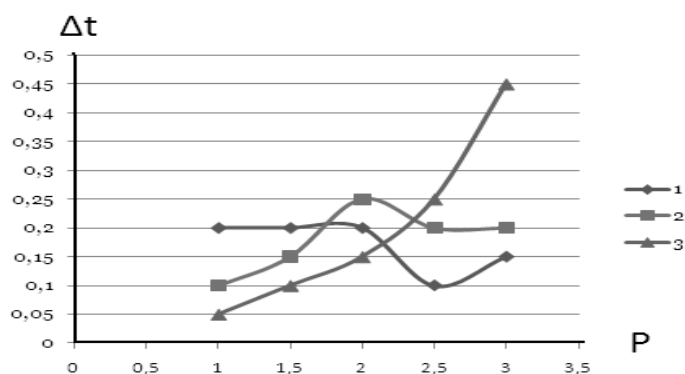


Рис.5. - Зависимость прироста температуры от мощности при частоте ультразвука: 1 - 6 кГц, 2 - 10 кГц, 3 - 20 кГц.

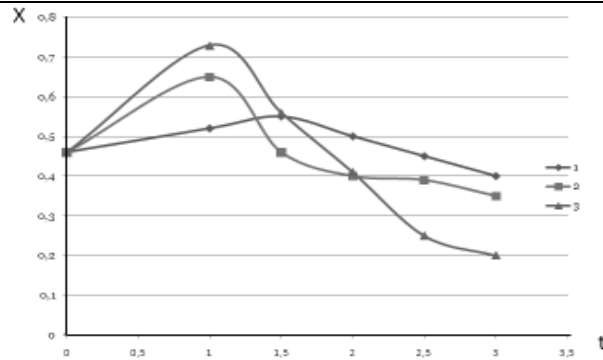
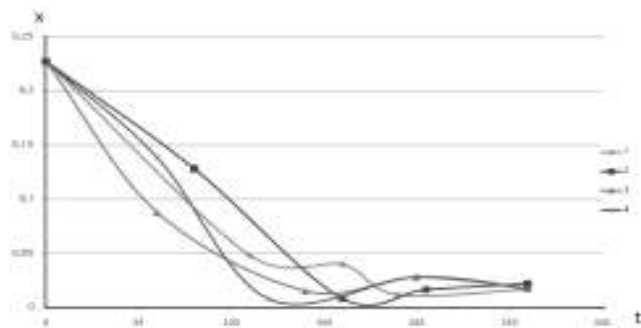


Рис.6. - Зависимость количества соли в объеме раствора от времени при намораживании: 1 – 30 мин., 2 – 1 час, 3 – 2 часа.

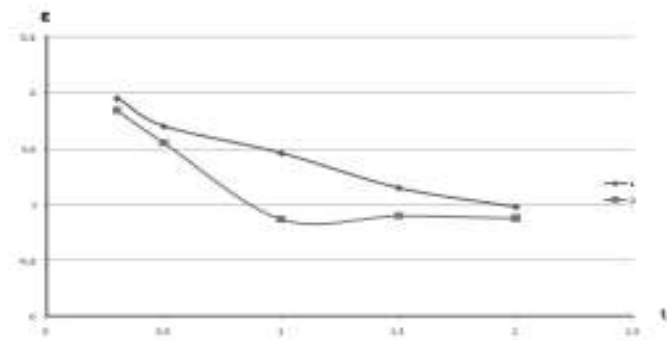
Опытным путем было установлено, что наилучший результат дало намораживание с применением генератора мощностью 20 кГц длительностью 2 часа. Далее эксперименты проводились над месторасположением самого интенсификатора. Результаты приведены на Рис. 7.



1 – сбоку; 2 – вплотную; 3 – центр на расстоянии 1 см; 4 – центр на расстоянии 1 см с кольцом-ограничителем.

Рис.7. - Зависимость количества соли в объеме раствора от времени с применением ультразвука частотой 20 кГц при разном расположении относительно блока льда.

Основываясь на данных проведенных экспериментов, путем решения уравнений материального баланса была выведена формула нахождения пористости блока льда: $\epsilon = V_l/V_6$.



1 – без ультразвука, 2 – с применением ультразвука.

Рис.8. - Зависимость пористости льда от времени вымораживания.

Выводы. Мировой практике известны достаточное количество методов опреснения воды, но вымораживание, бесспорно, имеет ряд своих преимуществ.

Результаты исследований показали, что наибольший эффект на процессы интенсификации и сепарирования оказал генератор с частотой ультразвука 20 кГц, расположенный в центре на расстоянии 1 см от блока льда с кольцом-ограничителем.

Проведенные исследования показали, что пористость в значительной степени влияет на процесс кристаллизации. Любые методы интенсификации приведут к росту скорости намораживания, но ценой получения пористой структуры. Поэтому задачей оптимизации можно считать поиск режимов и способов, при которых достигается необходимая производительность льдообразования при приемлемых параметрах плотности упаковки кристаллов льда.

Литература.

1. Сегодня и завтра водоподготовки/ Татьяна Митченко// Вода и водоочистные технологии – 2015. - №4(78). – с. 4. – Режим доступа до журн.: <http://waternet.ua/magazine>
2. Mathieu Legay, Nicolas Gondrexon, Stephane Le Person, Primius Boldo, Andre Bontemps “Enhancement of Heat Transfer by Ultrasound: Review and Recent Advances” // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Chemical Engineering Volume 2011, Article ID 670108, 17c. , DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/670108>.
3. Б.Е.Рябчиков. Современные методы подготовки воды. Минск, 2005.
4. В.Б. Чернозубов, В.Л. Подберезный, Н.К. Токманцев "Техника термического опреснения воды в системах водоподготовки и ликвидации солесодержащих промышленных стоков". //Экология и технология. Москва, 1994 г.
5. Бурдо О.Г. Совершенствование процессов и аппаратов пищевой и холодильной технологий на основе автономных теплопередающих устройств. Дис. д.т.н., Одесса, 1988 – 526 с.
6. Бурдо О.Г., Офатенко О.О. Анализ процессов деминерализации воды //36. наук. праць ОНАХТ Одеса, 2009. – Вип.35. – С. 287- 292.
7. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
8. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.

УДК 664.854

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ В МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНО – ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ

Малежик І.Ф. д-р техн. наук, Бурлака Т.В. аспірант,
Дубковецький І.В. канд. техн. наук, доцент, Деканський В.Є. асистент
Національний університет харчових технологій

APPLICATION OF THE POSSIBILITY THEORY IN MODELING OF THE PROCESS OF CONVECTIVE - THERMORADIATIVE DRYING OF CULTIVATED MUSTS

Malezhik I.F. Dr. Tech. Sciences, Burlaka T.V. postgraduate, Dubkovetsky IV Cand.
Tech. Sciences, associate professor (docent), dekansky V.E. assistant National University
of Food Technology

Анотація: Дослідження процесів, що протікають в технологічних установках, встановлення закономірностей їх протікання, знаходження залежностей, необхідних для їх аналізу і розрахунку, можна проводити різними методами: теоретичним, експериментальним, подоби.

Теоретичний метод заснований на складанні та вирішенні системи диференціальних рівнянь, що описують процес. Однак багато процесів технології такі складні, що вдається лише скласти систему диференціальних рівнянь і встановити умови однозначності. Вирішити ці рівняння відомими в математиці методами не представляється можливим.

Експериментальний метод дозволяє на основі досвідчених даних отримати емпіричні рівняння, що описують даний процес. Складнощі експериментального методу полягають у необхідності проведення великої кількості дослідів на реальних технологічних установках.

Складність деяких процесів іноді не дає змоги або розв'язати складену систему диференціальних рівнянь з використанням найкращих ЕОМ, або навіть поставити математичну задачу. У таких випадках змінні величини спочатку групують у безрозмірні комплекси або на основі диференціальних рівнянь, або шляхом використання методу аналізу розмірностей, а відтак одержують загальну функціональну залежність між цими комплексами. В основі даного методу лежить друга теорема Федермана - Бекінгема, що дає можливість обробки експериментальних даних у формі загального критеріального рівняння.

Інтенсивність досліджуваного процесу сушіння визначають коефіцієнтом масовіддачі β і коефіцієнтом тепловіддачі α . У зв'язку з труднощами, що виникають в результаті аналітичного моделювання, слід застосувати експериментальне моделювання, основною науковою базою якого є теорія подібності і метод «аналізу розмірностей». На основі його загальних принципів встановлюємо вид критеріального рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі β і коефіцієнтом тепловіддачі α .

Abstract: The study of processes occurring in technological installations, the establishment of the laws of their flow, finding dependencies necessary for their analysis and calculation, can be carried out by various methods: theoretical, experimental, similarities.

The theoretical method is based on the compilation and solving of a system of differential equations describing the process. However, many processes of technology are so complex that we can only complete the system of differential equations and establish the conditions of uniqueness. It is not possible to solve these equations in methods known in mathematics.

The experimental method allows us to obtain empirical equations describing this process on the basis of experimental data. The complexity of the experimental method consists in the necessity of conducting a large number of experiments on real technological installations.

The complexity of some processes sometimes does not make it possible either to solve a complex system of differential equations using the best computers, or even to put a mathematical problem. In such cases, variables are initially grouped into dimensionless complexes either on the basis of differential equations, or by using the dimensional analysis method, and thus obtain a general functional relationship between these complexes. The

308

basis of this method lies in the second theorem of Federmann-Buckingham, which enables the processing of experimental data in the form of a general criterion equation.

The intensity of the investigated drying process is determined by the coefficient of mass-transfer β and the coefficient of heat transfer α . In connection with the difficulties arising from the analytical modeling, experimental simulation should be applied, the basic scientific base of which is the theory of similarity and the method of "dimensional analysis". On the basis of its general principles, we establish the kind of a criterion equation for calculating of mass-transfer coefficient β and the coefficient of heat transfer α .

Ключові слова: коефіцієнт масовіддачі, тепловіддача, аналіз розмірностей, сушіння, культивовані гриби.

Keywords: mass-transfer coefficient, heat transfer, dimensional analysis, drying, cultivated mushrooms.

Вступ. Раціональні параметри сушіння та інтенсифікація процесу досягається комбінацією таких параметрів сушіння, як форма та розміри матеріалу, його питоме навантаження, швидкість руху і температура теплоносія. Істотний вплив на тривалість процесу має температура сушильного агента. Підвищенням температури досягається інтенсифікація зневоднення, час теплового впливу зводиться до мінімуму, що забезпечує економічність процесу. Однак при виборі теплового режиму необхідно враховувати гранично-допустиму температуру конкретного матеріалу, що визначається його термостійкістю. Аналіз хімічного складу культивованих грибів глина звичайна показує, що вони складаються з таких важливих для організму людини термолабільних речовин як білки, вуглеводи, органічні кислоти, ферменти, в яких відбуваються зміни при температурах 65–70°C. Тому одержати продукт високої якості можливо за умови, що температура матеріалу в процесі сушіння не перевищує свого критичного значення. Звідси витікає, що температуру теплоносія протягом усього процесу сушіння необхідно змінювати відповідно до закономірностей переносу теплоти і вологи у конкретному матеріалі.

Комбінація конвективного і терморадіаційного сушіння при імпульсному донесенні теплоти до поверхні культивованих грибів дозволяє досягнути бажаних якісних технологічних характеристик і зменшити витрати енергії в порівнянні з конвективним чи терморадіаційним сушінням. Це було доведено серією досліджень відображених в статтях [2,3,4]. Але система процесу описується великою кількістю факторів, які характеризують кінетику конвективно-терморадіаційного сушіння. Тому доцільно використовувати методи математичного моделювання для прогнозування оптимальних умов проведення процесу. Аналітичне моделювання, що використовувалось для опису процесу конвективно-терморадіаційного сушіння, є дещо спрощеним та не враховує факторів визначення імпульсного введення променевої енергії на поверхні продукту та в приміжовому паро-повітряному шарі. У зв'язку з труднощами, що виникають в результаті аналітичного моделювання, слід застосувати експериментальне моделювання, основною науковою базою якого є теорія подібності і метод «аналізу розмірностей».

Результати. Математичний опис процесу конвективно-терморадіаційного сушіння було одержано емпіричним методом. Інтенсивність процесу видалення вологи при конвективно-терморадіаційному сушінні визначають коефіцієнтом масовіддачі від приміжового шару до паро-повітряного середовища, що оточує продукт. Інтенсивність процесу видалення вологи також залежить від теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, що характеризується коефіцієнтом тепловіддачі.

Складання критеріального рівняння в залежності від коефіцієнта масовіддачі. Коефіцієнт масовіддачі залежить від наступних параметрів: швидкість теплоносія (w), розміри частинок сировини (d), коефіцієнт дифузії (D), питома маса продукції (P_s), густина вологи (ρ_b), в'язкість (μ). В досліджуваних умовах бародифузія пов'язана з впливом інфрачервоного випромінювання визначається різницею тисків, величина яких прямо пропорційна енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення (r) і потужності опромінення (N_{op}).

$$\beta = f(d, D, \mu, r, N_{op}, \rho_b, w, P_s)$$

Припустимо, що $w, d, D, P_s, \rho_b, \mu, r, N_{op}$ мають невідомі показники ступеня k, l, m, n, o, p, s, t . Таким чином, шукану функціональну залежність можна представити у наступному вигляді

$$\beta = d^k \cdot D^l \cdot \mu^m \cdot r^n \cdot N_{op}^o \cdot \rho_b^p \cdot w^r \cdot P_s^s$$

Основні складові формули занесено в табл.1.

Табл 1. Основні параметри досліджуваного процесу

№	Найменування параметра	Символ	Степінь	Розмірність
1	Середній коефіцієнт масовіддачі	β		$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
2	Розміри частинок	d	k	м
3	Коефіцієнт дифузії	D	l	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
4	В'язкість	μ	m	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
5	Питома теплота пароутворення	r	n	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
6	Потужність ІЧ – генераторів	$N_{\text{оп}}$	o	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
8	Густина вологи	$\rho_{\text{в}}$	p	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
9	Швидкість теплоносія	w	r	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
10	Питома маса продукції	P_s	s	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$

Очевидно, що для даного факторного простору число змінних 9 за кількості розмірностей 3. Тому за π - теоремою кількості безрозмірних комплексів $9 - 3 = 6$.

Для здійснення математичного аналізу рівняння складаємо матрицю в табл.2.

Табл.2 Матриця розмірностей досліджуваного степеневого ряду

	k	l	m	n	o	p	r	s	β
M			1		1	1		1	0
L	1	2	-1	2	2	-3	1	-2	1
τ		-1	-1	-2	-3		-1		-1

Всі ці параметри складаються з трьох основних розмірностей: маси (M), довжини (L), часу (τ), (табл. 2). Розмірності параметрів, що входять в рівняння, відомі, його можна записати:

$$[L\tau^{-1}] = [L]^k [L^2\tau^{-1}]^l [ML^{-1}\tau^{-1}]^m [M^2L^{-2}]^n [ML^2\tau^{-3}]^o \cdot [ML^{-3}]^p [L\tau^{-1}]^r [ML^{-2}]^s$$

або, розкривши дужки, одержимо:

$$[L\tau^{-1}] = L^{k+2l-m+2n+2o-3p+r-2s} \cdot M^{m+o+p+s} \cdot \tau^{-l-m-2n-3o-r}$$

Зрівняємо показники ступенів при однакових символах розмірностей і одержимо три рівняння:

$$\begin{cases} k+2l-m+2n+2o-3p+r-2s=1 \\ m+o+p+s=0 \\ -l-m-2n-3o-r=-1 \end{cases}$$

$$m=1-l-2n-3o-r$$

$$p=-1+l+2n+2o+r-s$$

$$k=1-2l+1-l-2n-3o-r-2n-2o-3-3l+6n+6o+3r-3s-r+2s$$

$$k=-1+2n+o+r-s$$

Одержані значення підставимо в рівняння.

$$\beta = d^{-1+2n+o+r-s} \cdot D^l \cdot \mu^{1-l-2n-3o-r} \cdot r^n \cdot N_{\text{оп}}^o \cdot \rho_{\text{в}}^{-1+l+2n+2o+r-s} \cdot w^r \cdot P_s^s$$

Згрупуємо величини за показниками ступенів і одержимо критеріальне рівняння у вигляді:

$$\frac{\beta d \rho}{\mu} = \left(\frac{\mu^2}{d^2 r \rho^2} \right)^{-n} \cdot \left(\frac{d N_{\text{оп}} \rho^2}{\mu^3} \right)^o \cdot \left(\frac{d^2 \rho w}{\mu} \right)^r \left(\frac{\mu}{D \rho} \right)^{-1} \left(\frac{P_s}{d \rho} \right)^s$$

Групи $\frac{\beta d \rho}{\mu}$ і $\frac{\mu}{D \rho}$ дають відношення коефіцієнта конвективного масообміну до коефіцієнта дифузії – число Шервуда:

$$\frac{\beta d \rho}{\mu} \cdot \frac{\mu}{D \rho} = \frac{\beta d}{D} = Sh$$

Відношення кількості руху потоку води до дифузійного потоку – число Шмідта:

$$\frac{\mu}{D \rho} = \frac{\nu}{D} = Sc$$

Комбінація:

$$\left(\frac{\mu^2}{d^2 r \rho^2} \right)^{-n} \cdot \left(\frac{dN_{on} \rho^2}{\mu^3} \right)^0 = \frac{N_{on}}{\mu dr} = Bu$$

число Бурдо, число енергетичної дії, що встановлює співвідношення між енергією випромінювання і енергією, яка необхідна для перетворення в пару води.

Відношення $\frac{d \rho w}{\mu}$ - число Рейнольдса:

$$\frac{d \rho w}{\mu} = Re$$

Комплекс $\left(\frac{P_s}{d \rho} \right)^s = A$ є безрозмірним і враховує продуктивність досліджуваного процесу.

Отже структура критеріального рівняння через числа подібності буде наступною:

$$Sh = A \cdot Sc^0 \cdot Re^\pi \cdot Bu^\epsilon$$

Константи $A, 0, \pi, \sigma, \epsilon$ визначаються експериментально і наведені в дод.

Табл 3. Параметри критеріїв подібності і досліджуваного процесу

№	Sc	Sc ⁰	Re	Re ^π	Bu	Bu ^ε	A	Sc ⁰ · Re ^π	Sc ⁰ · Re ^π · Bu ^ε
1.	0,214	2,434	2549,751	358,82	6,076 · 10 ⁻¹⁰	9,787 · 10 ⁵	0,04	-2,281	21,022
2.	0,218	2,408	3569,652	461,82	9,015 · 10 ⁻¹⁰	7,573 · 10 ⁵	0,083	-2,351	21,258
3.	0,223	2,377	4589,552	557,60	1,196 · 10 ⁻⁹	6,302 · 10 ⁵	0,129	-2,386	21,292
4.	0,227	2,353	5609,453	648,17	1,365 · 10 ⁻⁹	5,783 · 10 ⁵	1,833	-2,414	21,402

В результаті визначених констант із графічних залежностей та на основі розрахункових і експериментальних даних отримані критеріальні рівняння можна представити у вигляді:

$$Sh = A \cdot Sc^{-0,58} \cdot Re^{0,75} \cdot Bu^{-0,65}$$

Складання критеріального рівняння в залежності від коефіцієнта тепловіддачі. Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Він чисельно дорівнює кількості теплоти, що віддається (або приймається) одиницею поверхні в одиницю часу при різниці температур між поверхнею тіла і навколишнім середовищем в 1°.

Особливий вплив на теплообмін чинять наступні фізичні параметри: теплопровідність λ , питома теплоємність c , густина ρ , коефіцієнт температуропровідності a і коефіцієнт в'язкості μ .

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від наступних параметрів: швидкість теплоносія (w), розміри частинок сировини (d), коефіцієнт дифузії (D), питома маса продукції (P_s), густина води (ρ_w), в'язкість (μ). В досліджуваних умовах бародифузія пов'язана з впливом інфрачервоного

випромінювання визначається різницею тисків, величина яких прямо пропорційна енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення (r) і потужності опромінення ($N_{\text{оп}}$).

$$\alpha = f(w, d, \rho, \lambda, c, \mu, r, N_{\text{оп}}, P_s, a)$$

Припустимо, що $w, d, \rho, \lambda, c, \mu, r, N_{\text{оп}}, P_s, a$ мають невідомі показники ступеня $a, b, c, d, e, k, l, m, n, o$. Таким чином, шукану функціональну залежність можна представити у наступному вигляді

$$\alpha = w^a \cdot d^b \cdot \rho^c \cdot \lambda^d \cdot c^e \cdot \mu^k \cdot r^l \cdot N_{\text{оп}}^m \cdot P_s^n \cdot a^o$$

Основні складові формули заносимо в табл. 4.

Табл 4. Основні параметри досліджуваного процесу

№	Найменування параметра	Символ	Степінь	Розмірність
1	Коефіцієнт тепловіддачі			кг/(с ³ ·К)
2	Швидкість теплоносія	w	a	м·с ⁻¹
3	Розміри частинок	d	b	м
4	Густина вологи	ρ_B	c	кг·м ⁻³
5	Коефіцієнт теплопровідності	λ	d	м·кг/(с ³ ·К)
6	Питома (масова) теплоємність	c	e	м ² /(с ² ·К)
7	В'язкість	μ	k	кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹
8	Питома теплота пароутворення	r	l	м ² ·с ⁻²
9	Потужність ІЧ – генераторів	$N_{\text{оп}}$	m	кг·м ² ·с ⁻³
10	Питома маса продукції	P_s	n	кг·м ⁻²
11	Коефіцієнт температуропровідності	a	o	м ² ·с ⁻¹

Для здійснення математичного аналізу рівняння складаємо матрицю в табл. 5.

Табл 5. Матриця розмірностей досліджуваного степеневого ряду

	a	b	c	d	e	k	l	m	n	o	α
M			+1	+1		+1		+1	+1		+1
L	+1	+1	-3	+1	+2	-1	+2	+2	-2	+2	0
τ	-1			-3	-2	-1	-2	-3		-1	-3
K				-1	-1						-1

Всі ці параметри складаються з чотирьох основних розмірностей: маси (M), довжини (L), часу (τ), температури (K) (табл. 5). Розмірності параметрів, що входять в рівняння, відомі, його можна записати:

$$[M\tau^{-3}K^{-1}] = [L\tau^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [ML^{-3}]^c \cdot [ML\tau^{-3}K^{-1}]^d \cdot [L^2\tau^{-2}K^{-1}]^e \cdot [ML^{-1}\tau^{-1}]^k \cdot [L^2\tau^{-2}]^l \cdot [ML^2\tau^{-3}]^m \cdot [ML^{-2}]^n \cdot [L^2\tau^{-1}]^o$$

або, розкривши дужки, одержимо:

$$[M\tau^{-3}K^{-1}] = M^{c+d+k+m+n} \cdot L^{a+b-3c+d+2e-k+2l+2m-2n+2o} \cdot \tau^{-a-3d-2e-k-2l-3m-o} \cdot K^{-d-e}$$

Зрівняємо показники ступенів при однакових символах розмірностей і одержимо три рівняння:

$$\begin{cases} c + d + k + m + n = 1 \\ a + b - 3c + d + 2e - k + 2l + 2m - 2n + 2o = 0 \\ -a - 3d - 2e - k - 2l - 3m - o = -3 \\ -d - e = -1 \end{cases}$$

$$d = 1 - e$$

$$c = e - k - m - n$$

$$a = 3 - 3d - 2e - k - 2l - 3m - o$$

$$a = e - k - 2l - 3m - o$$

$$b = -a + 3c - d - 2e + k - 2l - 2m + 2n - 2o$$

$$b = -1 - k - 2m + e - n - o$$

Одержані значення підставимо в рівняння:

$$\alpha = w^{e-k-2l-3m-o} \cdot d^{-1-k-2m+e-n-o} \cdot \rho^{e-k-m-n} \cdot \lambda^{1-e} \cdot c^e \cdot \mu^k \cdot r^l \cdot N_{\text{оп}}^m \cdot P_s^n \cdot a^o$$

Згрупуємо величини за показниками степенів і одержимо критеріальне рівняння у вигляді:

$$\frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \left(\frac{wd\rho c}{\lambda} \right)^e \cdot \left(\frac{wd\rho}{\mu} \right)^{-k} \cdot \left(\frac{r}{w^2} \right)^l \cdot \left(\frac{wd}{a} \right)^{-o} \cdot \left(\frac{N_{\text{оп}}}{w^3 d^2 \rho} \right)^m \cdot \left(\frac{P_s}{d\rho} \right)^n$$

Критерій Нусельта – розглядають як співвідношення між інтенсивністю теплопередачі та напругою температурного поля в прикордонному шарі потоку теплоносія.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

Критерій Пекле

$$Pe = \frac{wd\rho c}{\lambda}$$

Критерій Рейнольдса - міра відношення сил інерції та молекулярного тертя, визначає подібність режиму течії в системі.

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}$$

Критерій Прандтля є мірою відношення інтенсивності передачі кількості руху за рахунок молекулярного переносу та інтенсивності переносу кількості теплоти за рахунок вільної конвекції, визначає подібність температурних та швидкісних полів.

$$Pr = \frac{wd}{a}$$

Фізичний сенс числа Bu полягає в тому, що встановлюється співвідношення між енергією випромінювання і тією енергією, яка необхідна для перетворення на пару всієї води, яка знаходиться в продукті.

$$Bu = \frac{N_{\text{оп}}}{rwd^2\rho}$$

Комплекс $\left(\frac{P_s}{d\rho} \right)^n = A$ є безрозмірним і враховує продуктивність досліджуваного процесу.

Отже структура критеріального рівняння через числа подібності буде наступною:

$$Nu = A \cdot Pe^\sigma \cdot Re^\pi \cdot Pr^\varepsilon \cdot Bu^\zeta$$

Константи $A, \sigma, \pi, \varepsilon, \zeta$ визначаються експериментально.

Табл 6. Параметри критеріїв подібності і досліджуваного процесу

№	Pe	Pe ^σ	Re	Re ^π	Pr	Pr ^ε	Bu	Bu ^ζ	A
1.	5681,286	29,12	6249,4	189,45	103,84	0,039	48,57·10 ⁻⁷	408350,17	50,3663
2.	7530,719	32,51	5917	183,34	136,84	0,032	71,82·10 ⁻⁷	543299,62	104,2654
3.	9179,104	35,11	5609,5	177,56	165,93	0,028	86,24·10 ⁻⁷	620949,71	160,9756
4.	10742,76	37,34	5371,4	173,00	193,07	0,025	96,82·10 ⁻⁷	675680,19	220,8835

В результаті визначених констант із графічних залежностей та на основі розрахункових і експериментальних даних отримані критеріальні рівняння можна представити у вигляді:

$$Nu = A \cdot Re^{0,39} \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{-0,7} \cdot Bu^{0,73}$$

Висновок. За даними експериментальних досліджень, при використанні методу аналізу розмірності та теореми Федермана-Бекінгема було побудовано критеріальні рівняння процесу масообміну та теплообміну при конвективно-терморадіаційному сушінні культивованих грибів, що визначаються критеріями Пекле, Ренольдса, Прандля, Бурдо, функцією, яка характеризує продуктивність досліджуваного процесу; та дозволяє сформулювати рекомендований ряд параметрів робочого режиму. Показники степеня визначались дослідним шляхом, для чого будувався графік залежності у логарифмічній системі координат.

Література

1. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1982. – 655 с.
2. Дубковецкий І.В., Малежик І.Ф., Бурлака Т.В. / Визначення основних тепломасообмінних параметрів сушіння культивованих грибів при різних способах енергопідведення // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: 2016. – Вип. 1. – Том. 80. – С. 53-58.
3. Дубковецкий І.В., Малежик І.Ф., Бурлака Т.В. / Вплив швидкості теплоносія на основні тепломасообмінні параметри конвективно-терморадіаційного сушіння культивованих грибів // Наукові праці НУХТ. – 2016. – Том 22. – №4. – С.141-148.
4. Бурлака Т. В., Дубковецкий И.В., Малежик И. Ф., Жукова Я.Ф. / Исследование биологически активных веществ при сушке культивированных грибов вешенки / Научни трудове Хранителни технологии. – Пловдив: 2015. – Том LXII. – С. 331-336

УДК 664.061.4:084

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ **МИСЮРА Т.Г., канд. техн. наук, доцент, ЗАВ'ЯЛОВ В.Л. докт. техн. наук, проф.,** **ЛОБОК О.П., канд. фіз.мат. наук, доцент, ПОПОВА Н.В., ЗАПОРОЖЕЦЬ Ю.В.** **канд-ти техн. наук, доценти**

Національний університет харчових технологій, м. Київ

IDENTIFICATION OF THE COMPLETE MODEL PARAMETERS WITH REFRACTIVE FLOWS IN VIABROETRACTORS **Mysurya T.G., Cand. Tech. Sciences, associate professor, ZAV'YALOV VL Doc. Tech.** **Sciences, prof., LOBOK O.P., Cand. Physical weight Sciences, associate professor,** **POPOVA NV, ZAPORozHETS Yu.V. Kanti tech Sciences, associate professors** **National University of Food Technologies, Kyiv**

Анотація: Ефективна робота віброекстракційної апаратури передбачає оптимізацію співвідношення між мікро-і макромасштабними параметрами дії турбулентних пульсуючих струменів, що можливо здійснити лише при більш глибокому аналізі їх природи на стадії генерування віброперемішувальними пристроями і розповсюдження в робочому об'ємі апарата. Разом з тим, відомі методи розрахунку гідродинамічних, теплових і масообмінних характеристик традиційних екстракторів є непридатними у практичному використанні для віброекстракторів.

В представлених матеріалах зосереджено увагу на математичному описі моделі структури потоків на основі реальної комірчастої моделі із зворотними потоками за результатами випробувань пілотного віброекстрактора безперервної дії колонного типу.

Показано, що в реальних умовах ідеалізовані моделі структури потоків в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом руху фаз не забезпечують належну точність опису гідродинамічної

структури потоків за причиною наявності в робочому об'ємі апарата додаткових гідродинамічних ефектів внаслідок створення віброперемішувальними пристроями нерівномірного профілю швидкостей окремих потоків в поперечному перерізі апарата – поздовжнім перемішуванням. Для встановлення, обґрунтованого в заданих технологічних межах зв'язку між конструктивними та технологічними параметрами процесу, застосовувалась аналітична теорія структури потоку.

Представлені аналітичні дослідження структури гідродинамічних робочих потоків в умовах твердофазового безперервного віброекстрагування з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента на основі комірчастої моделі із зворотними потоками. Для спрощеного введення початкових параметрів та для наочного зображення результатів розрахунків було створено віртуальний тренажер. Аналітичні результати можуть бути використані на стадії проектування, конструювання віброекстракційної апаратури та при розв'язанні оптимізаційних задач.

Створена за відповідним алгоритмом програма розрахунків реалізована за допомогою пакета MatLAB і дозволяє визначити розподіл концентрацій екстрактивної речовини за проточними і застійними зонами окремо по кожній фазі в часі, а також у кожній комірці робочої зони віброекстрактора безперервної дії.

Abstract: Effective operation of the vibroextraction apparatus provides for optimizing the relationship between the micro- and macro-scale parameters of the action of turbulent pulsating jets, which is possible only with a deeper analysis of their nature at the stage of generation by vibro-mixing devices and propagation in the working volume of the apparatus. At the same time, methods for calculating the hydrodynamic, thermal, and mass-exchange characteristics of traditional extractors are currently unsuitable for practical use for vibro-extractors.

The presented materials focus on the mathematical description of the flow pattern model on the basis of a real cell model with backflows based on the results of testing a continuous column-type vibro-extractor.

It is shown that in real conditions idealized models of the flow pattern in devices with an intensive hydrodynamic regime of the phases do not provide the proper accuracy of the description of the hydrodynamic flow structure due to the presence of additional hydrodynamic effects in the working volume of the apparatus due to the creation by vibro-mixing devices of an unequal velocity profile of individual flows in the cross section of the apparatus - Longitudinal mixing. To establish the connection between the design and technological parameters of the process, justified within given technological limits, an analytical theory of the flow structure was used.

Presented analytical studies of the structure of hydrodynamic workflows under conditions of two-phase continuous vibroextraction taking into account the density of external sources of accumulation of the target component based on the collar model with backflows. To simplify the input of initial parameters and to visualize the results of calculations, a virtual simulator was created. Analytical results can be used at the design stage, the design of vibroextraction equipment and in solving optimization problems.

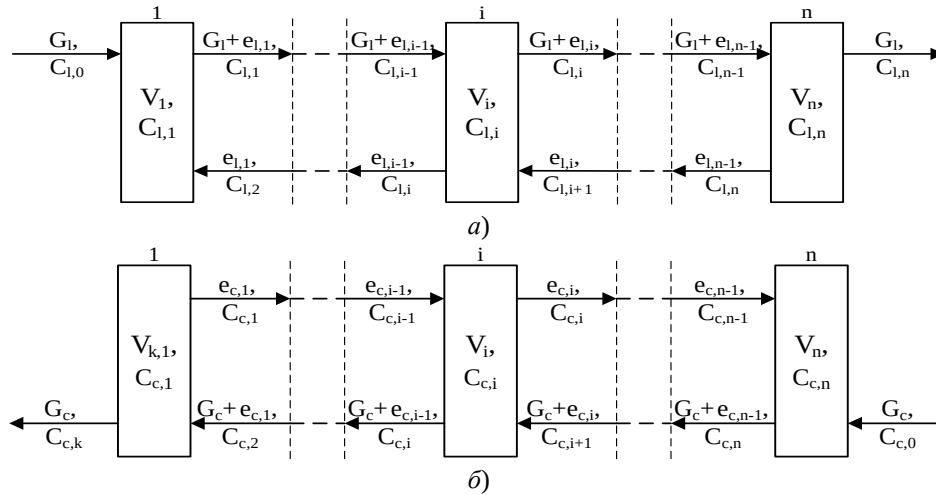
The calculation program created by the corresponding algorithm is implemented using the MatLAB package and allows determining the distribution of extractant concentrations with flow and stagnant zones separately for each phase in time, as well as in each cell of the working zone of the continuous vibro-extractor.

Ключові слова: математична модель, структура потоків, зворотний потік, комірчаста модель, віброекстрагування, розподілення речовини.

Keywords: mathematical model, flow structure, returning stream, cellular model, vibration extraction, distribution of matter.

Віброекстрактори безперервної дії працюють в режимі зустрічного руху взаємодіючих фаз, використовуючи новий принцип розділення за допомогою спеціальних вібротранспортувальних пристроїв, які не викликають пресування шару сировини та забезпечують його поруватість, незалежно від розміру частинок. При цьому тривалість перебування усіх частинок у робочому об'ємі апарата майже однакова і як наслідок — найбільш повно використовується рушійна сила процесу [1-5].

Разом з тим протічній рух фаз в реальних умовах не завжди може бути рівноцінним ідеальній схемі потоку внаслідок створення віброперемішувальними пристроями нерівномірного профілю швидкостей окремих потоків в поперечному перерізі апарата – поздовжнім перемішуванням. Як правило, поздовжнє перемішування значно зростає при переході від лабораторних, пілотних апаратів до промислових зразків. Тому такі ефекти повинні знаходитись в зоні постійної уваги в процесі масштабування апаратів.



$0 \leq \tau \leq T$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; V_i — об'єм i -тої комірки, м^3 ;
 $C_{l,i}$, $C_{c,i}$ — концентрація індикатора в рідкій та твердій фазі, $\text{кг}/\text{м}^3$; $e_{l,i}$, $e_{c,i}$ — об'ємна швидкість
зворотного потоку із $(i+1)$ комірки в i -ту та із i -тої в $(i+1)$ -ту комірки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Рис.1. Параметрична схема комірчастої моделі із зворотними потоками

Для кількісного оцінювання аномальних гідродинамічних зон в апаратах колонного типу існує ряд моделей структури потоків, раціональний вибір якої надає можливість передбачити оптимальні режимні та конструктивні параметри апарата та забезпечити надійне масштабування процесу на мікро і макрорівні. Аналітичний опис структури потоків розглядався для конструкції пілотного віброекстрактора безперервної дії [6, 7].

Враховуючи реалії гідродинамічної обстановки в апараті, створеної пульсуючими струменями, що генеруються транспортувальними елементами вібруючих насадок, в робочому об'ємі апарата нами виконано відповідне моделювання на основі комірчастої моделі із зворотними потоками. Для цього нами проаналізована і узагальнена комірчаста модель із зворотними потоками, для випадків різних розмірів комірок віброекстрактора та різних величин зворотних потоків.

З метою оцінки розмірів зворотних потоків між комірками та інших параметрів, пов'язаних з ними, нами проаналізована комірчаста модель із зворотними потоками, параметрична форма якої для рідкої (рис.1а) та твердої (рис.1б) фази має вигляд.

В загальному випадку основні рівняння комірчастої моделі з застійними зонами за рідкою фазою (рис.1а) мають вигляд:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dC_{l,1}}{d\tau} = Q_l \cdot C_{l,0} + e_{l,1} \cdot C_{l,2} - (Q_l + e_{l,1}) \cdot C_{l,1} \\ V_i \cdot \frac{dC_{l,i}}{d\tau} = (Q_l + e_{l,i-1}) \cdot C_{l,i-1} + e_{l,i} \cdot C_{l,i+1} - (Q_l + e_{l,i} + e_{l,i-1}) \cdot C_{l,i} \\ V_n \cdot \frac{dC_{l,n}}{d\tau} = (Q_l + e_{l,n-1}) \cdot C_{l,n-1} - (Q_l + e_{l,n-1}) \cdot C_{l,n} \end{cases} \quad (1)$$

де $0 \leq \tau \leq 1$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; V_i — об'єм i -тої комірки, м^3 ; $C_{l,i}$ — концентрація індикатора в рідкій фазі в i -тій комірці, $\text{кг}/\text{м}^3$; $e_{l,i}$ — об'ємна швидкість потоку зворотного потоку із i комірки в $(i+1)$ -ту, $\text{м}^3/\text{с}$.

$$e_{l,i} = f_{l,i} \cdot Q_l, \quad (2)$$

де $0 \leq f_{l,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, яка повертається з $(i+1)$ в i -ту комірку.

$$\text{Об'єм апарата та час перебування частинок в апараті: } V = \sum_{i=1}^n V_i, \quad T = \sum_{i=1}^n V_i / Q_l = V / Q_l \quad (3)$$

$$0 \leq \tau \leq T, \quad 0 \leq \tau/\theta \leq 1; \quad \tau/T = \theta; \quad 0 \leq \theta \leq 1$$

де τ — розмірна величина часу, с; θ — безрозмірна величина часу.

Покладемо наступні початкові умови:

$$C_{1,i}(0) = V_{\text{инд.}}/V_i, \quad C_{1,0} = \bar{V}_{\text{инд.}}/V_i, \quad C_{1,i}(0) = 0, \quad i = 2, \dots, n, \quad e_{1,n} = 0, \quad f_n = 0, \quad e_{1,0} = 0, \quad f_0 = 0 \quad (4)$$

де $V_{\text{инд.}}$ — кількість імпульсно введеного індикатора, кг; $\bar{V}_{\text{инд.}}$ — кількість ступінчасто введеного індикатора, кг.

Для обезрозмірювання другого рівняння системи (1) домножимо його на $T/(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}})$:

$$\frac{V_i \cdot T}{V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}} \cdot \frac{dC_{1,i}}{d\tau} = \frac{T \cdot (1 + f_{1,i-1}) \cdot Q_i \cdot V_{i-1}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot V_{i-1}} \cdot C_{1,i-1} + \frac{T \cdot f_{1,i} \cdot Q_i \cdot V_{i+1}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot V_{i+1}} \cdot C_{1,i+1} - \frac{T \cdot (1 + f_{1,i} + f_{1,i-1}) \cdot Q_i \cdot V_i}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot V_i} \cdot C_{1,i}; \quad (5)$$

Зробимо заміну $z_i = V_i \cdot T \cdot C_{1,i} / (V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}})$; (6)

Після підстановки (6) в (5), отримуємо:

$$\frac{dz_i}{d\theta} = \frac{(1 + f_{1,i-1}) \cdot V}{V_{i-1}} \cdot z_{i-1} + \frac{f_{1,i} \cdot V}{V_{i+1}} \cdot z_{i+1} - \frac{(1 + f_{1,i} + f_{1,i-1})}{V_i} \cdot z_i \quad (7)$$

Зробивши заміну $\mu_i = V_i/V$ (8)

отримуємо $\frac{dz_i}{d\theta} = \frac{1 + f_{1,i-1}}{\mu_{i-1}} \cdot z_{i-1} + \frac{f_{1,i}}{\mu_{i+1}} \cdot z_{i+1} - \frac{(1 + f_{1,i-1} + f_{1,i})}{\mu_i} \cdot z_i$ (9)

Обезрозмірюємо початкові умови

$$z_i(0) = V_i \cdot C_{1,i}(0) / (V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) = V_{\text{инд.}}/V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}, \quad (10)$$

$$z_i(0) = 0, \quad i = 2, \dots, n, \quad (1 + f_0) \cdot z_0/\mu_0 = \bar{V}_{\text{инд.}} / [(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot \mu_1] \quad (11)$$

Зробивши заміну $(1 + f_{1,i-1})/\mu_{i-1} = a_i, \quad f_{1,i}/\mu_{i+1} = c_i, \quad -(1 + f_{1,i-1} + f_{1,i})/\mu_i = b_i$ (12)

отримуємо:

$$\frac{dz_i}{d\theta} = a_i \cdot z_{i-1} + b_i \cdot z_i + c_i \cdot z_{i+1} \quad (13)$$

Представивши рівняння (13) у векторній формі, маємо:

$$A = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & c_4 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & b_n \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Таким чином, маємо систему з вектором невідомих

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\theta} = A \cdot z + f; \\ z(0) = z^0, \end{cases} \quad z^0 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}})} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\bar{V}_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot \mu_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} f_{1,1} \\ f_{1,2} \\ f_{1,3} \\ f_{1,4} \\ \dots \\ f_{1,n} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

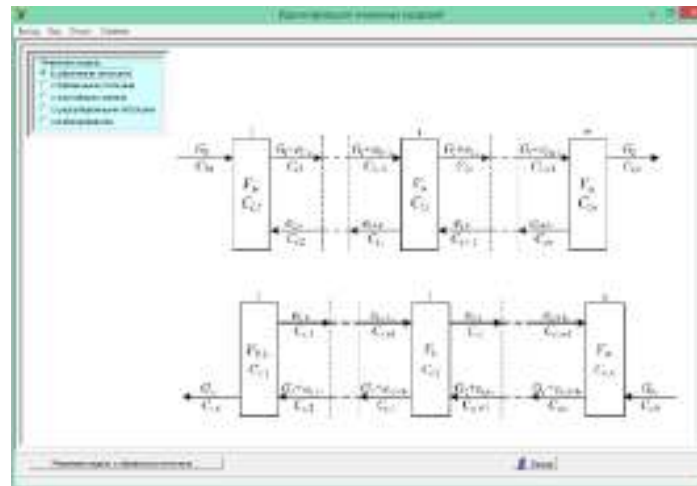


Рис.2. — Загальний вигляд головного вікна віртуального тренажера.

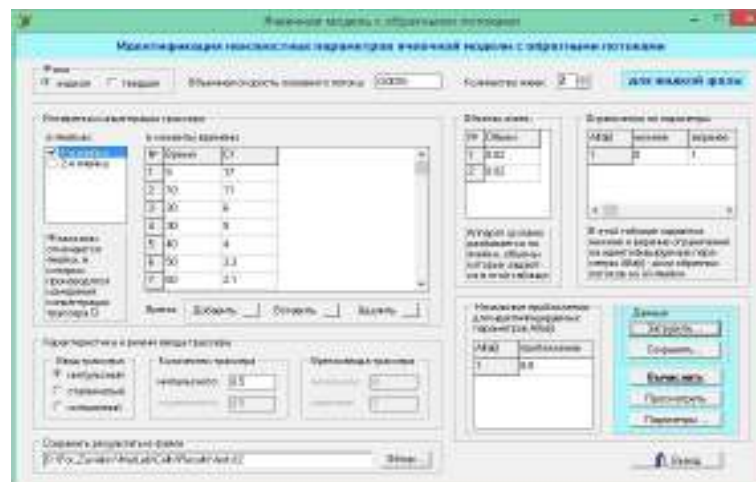


Рис.3. — Вікно налаштувань та введення вхідних даних віртуального тренажера.

Створена за відповідним алгоритмом програма розрахунків реалізована за допомогою пакета MatLAB і дозволяє визначити розподіл концентрацій екстрактивної речовини за проточними і застійними зонами окремо по кожній фазі в часі, а також у кожній комірці. На рис. 4 — 6 як приклад зображено результати даної програми.

Основні рівняння комірчастої моделі з застійними зонами за твердою фазою (рис. 1б) розробляються і перетворюються аналогічно попередньому варіанту мають вигляд:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dC_{c,1}}{d\tau} = (Q_c + e_{c,1}) \cdot C_{c,2} - (Q_c + e_{c,1}) \cdot C_{c,1} \\ V_i \cdot \frac{dC_{c,i}}{d\tau} = (Q_c + e_{c,i}) \cdot C_{c,i+1} + e_{c,i-1} \cdot C_{c,i-1} - (Q_c + e_{c,i-1} + e_{c,i}) \cdot C_{c,i} \\ V_n \cdot \frac{dC_{c,n}}{d\tau} = Q_c \cdot C_{c,n+1} + e_{c,n-1} \cdot C_{c,n-1} - (Q_c + e_{c,n-1}) \cdot C_{c,n} \end{cases}, \quad (16)$$

де $0 \leq \tau \leq 1$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; V_i — об'єм i -тої комірки, m^3 ; $C_{c,i}$ — концентрація індикатора в твердій фазі в i -тій комірці, kg/m^3 ; $e_{c,i}$ — об'ємна швидкість потоку зворотного потоку із i комірки в $(i + 1)$ -ту, m^3/c .

$$e_{c,i} = f_{c,i} \cdot Q_c, \quad (17)$$

де $0 \leq f_{c,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, яка повертається з $(j+1)$ в j -ту комірку.

Наступні операції з перетворення, обезрозмірювань та спрощень рівнянь здійснюються аналогічно комірчастої моделі з застійними зонами за рідкою фазою (рівняння (3) — (15)). В результаті маємо

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\theta} = A \cdot z + f; \\ z(0) = z^0, \end{cases} \quad z^0 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}})} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\bar{V}_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot \mu_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} f_{c,1} \\ f_{c,2} \\ f_{c,3} \\ f_{c,4} \\ \dots \\ f_{c,n} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

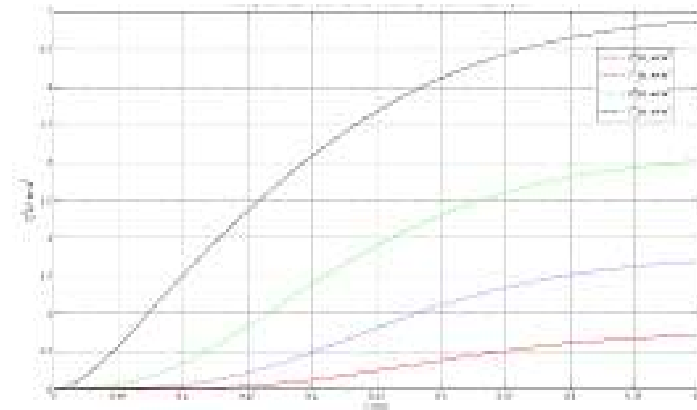


Рис.4. Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах рідкої фази

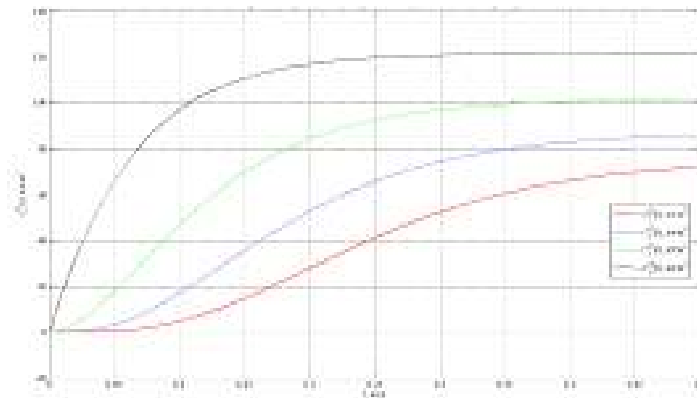


Рис.5. — Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах твердої фази

Для ідентифікації та оптимізації отриманих значень параметрів математичних моделей (15) та (18) була розроблена програма розрахунку в пакеті MATLAB. Також для спрощеного введення початкових параметрів та для наочного зображення результатів розрахунків було створено віртуальний тренажер, головне вікно якого зображене на рис. 2, а вікно налаштувань — на рис. 3.

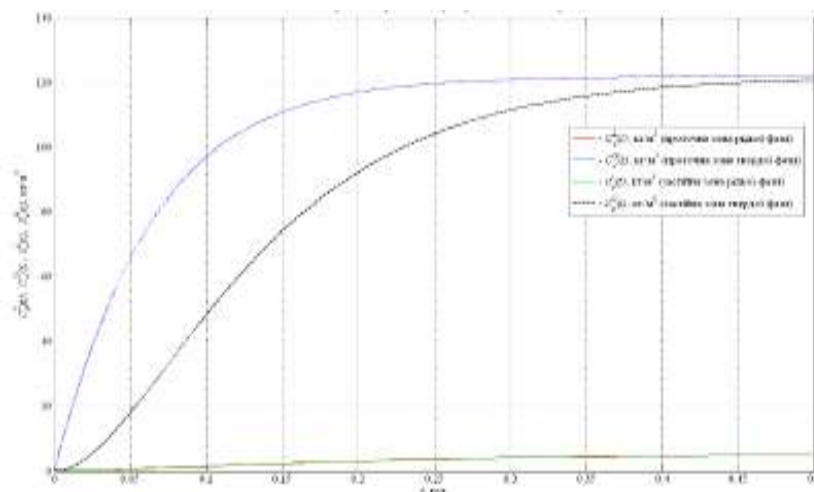


Рис.6. — Вміст екстрактивних речовин в n-ій комірці

Висновки. В результаті аналітичних досліджень структури гідродинамічних робочих потоків в умовах твердофазного неперервного віброекстрагування з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента на основі комірчастої моделі із зворотними потоками, отримано відповідні математичні моделі, які можуть бути використані на стадії проектування, конструювання віброекстракційної апаратури колонного типу та при розв'язанні оптимізаційних задач.

Література.

1. Зав'ялов В. Л. Особливості приводних систем екстракційного обладнання з коливальним ефектом робочого середовища / В. Л. Зав'ялов Костюк В. С., Мисюра Т.Г., Бодров В. С., Костюк Є. В., Запорожець Ю. В., Попова Н. В. — Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. — Х.: НТУ «ХПІ». — 2016. — № 18 (1190) с. 30 – 39. — doi:10.20998/2413-4295.2016.12.01.
2. Зав'ялов В.Л. Математичний опис гідродинамічної структури потоків при безперервному віброекстрагуванні на основі комірчастої моделі із застійними зонами / Зав'ялов В.Л., Лобок О.П., Мисюра Т.Г., Запорожець Ю.В., Попова Н.В., Бодров В.С. — Одеса: Наукові праці ОНАХТ. — № 48. Том 2., 2016. — с. 75-78.
3. Городецкий И.Я. Вибрационные массообменные аппараты / И.Я. Городецкий, А.А. Васин, В.М. Олевский, П.А. Лупанов / под ред. В.М. Олевского, — М.: Химия, 1980. — 192 с.
4. Vladimir Zavialov. Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. / Vladimir Zavialov, Viktor Bodrov, Taras Misyura, Nataliya Popova, Yuliya Zaporozhets Vadim Dekanskiy — Chemistry & Chemical Technology, 2015, 9(3), 367-374.
5. Пат. винах. 86485 Україна, МІЖ⁶ В 01 D 11/02. Вібратійний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В., Бодров В.С.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. — № a200707563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.
6. Зав'ялов В.Л. Математичне моделювання структури потоків в віброекстракторах безперервної дії колонного типу з вібруючою системою розділення фаз / Зав'ялов В.Л., Лобок О.П., Мисюра Т.Г., Запорожець Ю.В., Попова Н.В., Бодров В.С. — Одеса: Наукові праці ОНАХТ. — № 43. Том 2., 2013. — с. 26-29.
7. Зав'ялов В.Л. Закономірності дії пульсуючих потоків в умовах протитечіного розділення фаз при віброекстрагуванні із рослинної сировини. / Зав'ялов В.Л., Мисюра Т.Г., Бодров В.С., Запорожець Ю.В., Попова Н.В., Деканський В.С. — Будапешт: Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences — III (5), Issue:41. — 2015. — С. 95—99.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ

Бухкало С.І. канд. техн. наук, професор
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

MODELING OF INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES UTILIZATION OF POLYMERS

Bukhkalov S.I. Cand. Tech. Sciences, professor
National Technical University «KhPI», Kharkov, Ukraine

Анотація: Розглянуто деякі особливості використання ТПВ на комплексному підприємстві, яке може забезпечувати всі свої енергетичні потреби самостійно. Дослідження спрямовані на вивчення таких питань, як розробка моделей утилізації-модифікації полімерної частини ТПВ або тари та пакування. При цьому враховувалися фактори вибору науково-обґрунтованих методів переробки та утилізації полімерів; розробку необхідних технологічних схем і устаткування для переробки полімерних відходів; вибір підприємств для реалізації утилізації полімерів і виду енергетичних ресурсів для реалізації цих проектних рішень.

Abstract: Some features of the possibilities of solving evidence-based problems of improving the use of wastes of different industries on a complex enterprise that can provide all its energy needs alone. The problem of wastes utilization and recycling is present as complex research and analysis of energy- and resource saving processes for treatment of polymer wastes of various origin. The research focused on the study of issues such as the development of models of waste-modifying polymer. The investigation are focused in researching such problems as selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice of modifications additives and equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization.

Ключевые слова: интегрированные энерго- и ресурсосберегающие технологии, объект научно-обоснованной технологии, модели вспенивания.

Keywords: integrated energy technologies, evidence-based methods, wastes conversion and recycling.

Постановка проблеми. Створення інноваційних комплексних підприємств з утилізації твердих побутових відходів (ТБВ) різного походження та використання фактично повністю відходів і викидів всіх складових власного виробничого комплексу або інших підприємств, є основною метою проведених нами робіт. Для експериментальних досліджень на інноваційних об'єктах необхідно вирішити три основні завдання з моделювання процесів утилізації ТБВ, а саме як: 1) проводити експеримент, щоб кількість дослідів була мінімальною, а результати досить повно характеризували досліджуваний процес; 2) оцінити точність і достовірність отриманих експериментальних даних; 3) на основі отриманих результатів побудувати робочу математичну модель досліджуваного явища. Об'єкт дослідження ХТС – деякі моделі інноваційних енерготехнологій – комплексна переробка-утилізація полімерної частки полімерної тари та пакування або полімерної частки твердих побутових відходів. Такі процеси можна визначити за схемою технологічної структури стадій виробництва і заданих параметрів [1–8]: ПІДГОТОВЧІ → ОСНОВНІ → ЗАКЛЮЧНІ.

Вироби із спінених вторинних полімерів знаходять все більш широке застосування майже у всіх галузях промисловості, будівництва й побуту, легкій, харчовій та інших галузях промисловості, а також у сільському господарстві [1–5]: наприклад, спінені полімерні матеріали широко застосовують як різновиди теплоізоляції, елементи амортизаторів і фільтрів для розділення та очистки газів і рідин, плавучих засобів, декоративного облицювання, тари й пакування.

Широке впровадження отримали спінені матеріали в будівництві, а також у капітальному ремонті та реконструкції житлових споруд. Сумарний ефект економії теплоти в таких спорудах досягає 50 %, що

дозволяє швидко окупити витрати, спрямовані на застосування енергоефективних технологій. Разом з використанням теплоізоляції для зниження втрат енерготеплових систем їх застосування також потрібне для обмеження негативного теплового впливу на навколишнє середовище.

Формулювання цілей статті. З метою вдосконалення технології утилізації полімерних поліетиленових відходів як частини ТПВ досліджувалася можливість отримання спіненого вторинного поліетилену (ВВПЕ). створення нової ефективної науково-обґрунтованої, маловідходної або безвідходної технології утилізації, котра дозволяє одержувати цільові продукти для хімічної промисловості та енергоносії, а з системи мають виводитися тільки продукти, що складають біосферу. Створення таких технологій дозволяє вирішувати два взаємозалежні завдання: 1) екологічна безпека утилізації частини ТПВ з урахуванням ресурсо- і енергозбереження, і 2) економічна доцільність, з урахуванням соціальної ефективності, що дозволяє інтенсивно розвивати галузі промисловості.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтування отриманих наукових результатів. Для підвищення якості виробів з ВВПЕ необхідно отримати і досліджувати математичні моделі впливу чинників: 1) зміни властивостей в процесі експлуатації поліетиленової плівки і 2) технологічних параметрів процесу спінювання для різновидів асортименту галузей використання виробів. При розробці процесу спінювання вторинного поліетилену, отриманого на основі об'єкта дослідження – поліетиленової плівки (табл. 1), тривалої експлуатації, використовували методи повного факторного експерименту (ПФЕ).

Табл 1. ПФЕ для функцій відклику

№	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,57
2	+	-	+	+	-	-	+	-	1,20
3	+	+	-	+	-	+	-	-	0,65
4	+	-	-	+	+	-	-	+	1,81
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,64
6	+	-	+	-	-	+	-	+	1,63
7	+	+	-	-	-	-	+	+	4,79
8	+	-	-	-	+	+	+	-	4,76

Досліджували руйнівне напруження при розриві ВВПЕ, прийняте в якості вихідного параметра Y (%). Фактори (табл. 1) були параметри проведення процесу спінювання: X₁ – кількість комплексу для активації, %; X₂ – температура спінювання, оС; X₃ – час витримки при температурі спінювання, хв. Вихідні дані: X₁₀= 3; X₂₀=170; X₃₀= 15; ΔX₁= 1; ΔX₂= 10; ΔX₃= 5. Для першої функції відгук описує лінійна модель:

$$Y_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (1)$$

Параметри лінійної моделі та їх довірчі інтервали представлені в таблиці 2.

Табл 2. Параметри лінійної моделі та їх довірчі інтервали

Параметр	Нижня границя	Значення	Верхня границя
b ₀	0,8196	2,0062	3,1929
b ₁	-1,5304	-0,3438	0,8429
b ₂	-2,1829	-0,9963	0,1904
b ₃	-2,1354	-0,9487	0,2379

З довірною ймовірністю 95% довірні інтервали для b₁, b₂, b₃ охоплюють нуль. Уточнена модель:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3, \quad (2)$$

має такі параметри та довірні інтервали (табл. 3):

Табл 1. Параметри уточненої моделі та довірні інтервали для них

параметр	нижня границя	значення	верхня границя
b_0	-0,4556	2,0062	4,4681
b_1	-2,8056	-0,3438	2,1181
b_2	-3,4581	-0,963	1,4656
b_3	-3,4106	-0,9487	1,5131
b_4	-2,5231	-0,0612	2,4006
b_5	-2,5656	-0,1038	2,3581
b_6	-1,6381	0,8237	3,2856

Долучення ще однієї, восьмої базисної функції $x_1x_2x_3$, перетворює задачу на інтерполяційну: функція відгуку Y буде точним аналітичним виразом:

$$Y = 2,0062 - 0,3438x_1 - 0,9963x_2 - 0,9487x_3 - 0,0612x_1x_2 - 0,1038x_1x_3 + 0,8237x_2x_3 + 0,1938x_1x_2x_3 \quad (2)$$

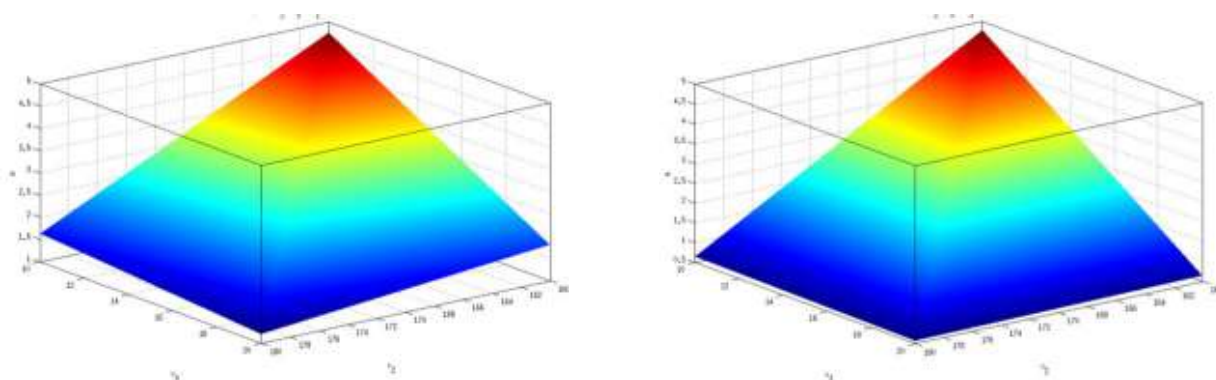


Рис. 1. Моделі впливу параметрів спінування X_1 для функції відклику Y .

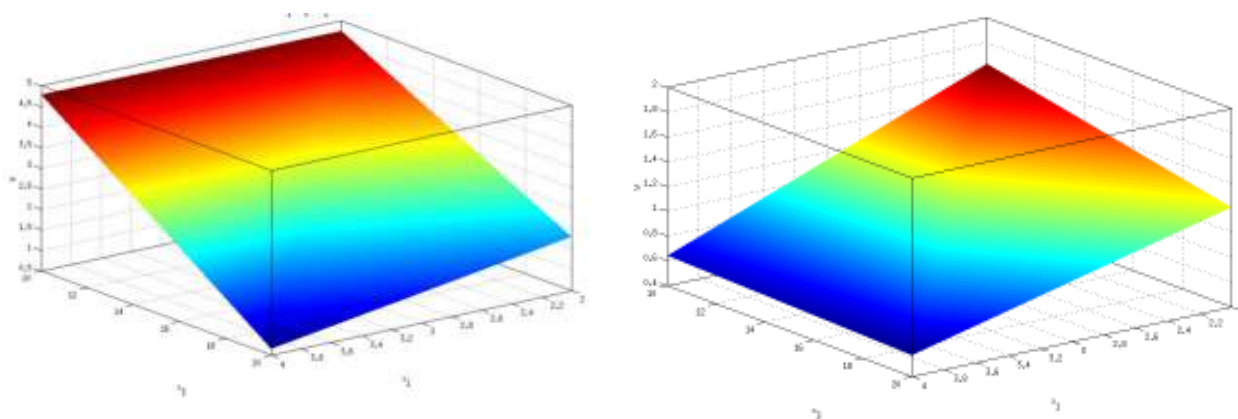


Рис. 2. Моделі впливу параметрів спінування X_2 для функції відклику Y .

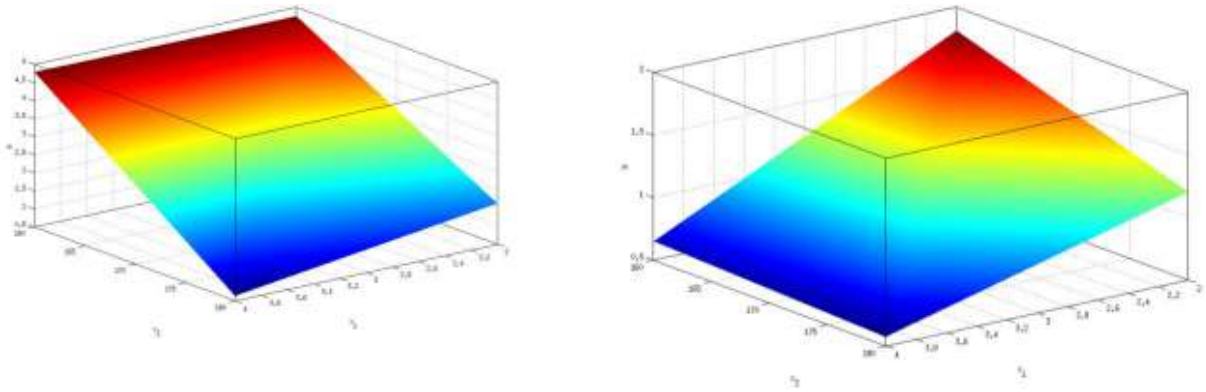


Рис. 3. Моделі впливу параметрів спінування X_3 для функції відклику Y .

Довірних інтервалів тут немає.

На рисунках 1–3 показані двовимірні перерізи функції відгуку при сталому (мінімальному або максимальному) значенні однієї якоїсь змінної.

При цьому оптимальний набір параметрів переробки (спінування) буде обумовлений координатами площин: $Y = f(X_2, X_3)$ (рис. 1), відповідно праворуч при $X_1 = 2$ і ліворуч – $X_1 = 4$; $Y = f(X_1, X_3)$ (рис. 2), відповідно праворуч при $X_2 = 160$ і ліворуч – $X_2 = 180$; де $Y = f(X_1, X_2)$ (рис. 3), відповідно праворуч при $X_3 = 10$ і ліворуч – $X_3 = 20$.

Висновки. На практиці комплексного виробництва з інноваційних енерготехнологій, перш за все, для реалізації представлених досліджень необхідно: 1) визначити принципи комплексного методу класифікації-ідентифікації ТПВ та відділення від неї полімерної частини; 2) при вирішенні питань управління екологічною безпекою утилізації ТПВ враховувати систему екологічного нормування і екологічної оцінки ризиків для здоров'я населення.

Таким чином, можна відмітити, що аналітичні дослідження у галузі утилізації ТБО пов'язані з моделюванням процесів кінцевих інноваційних енерготехнологій використання й утилізації-модифікації великотоннажних різновидів полімерних матеріалів як частини хіміко-технологічних систем (ХТС).

В даній роботі подовжена вперше запропонована нами [2–7, 9–14] науково-обґрунтована ідентифікація-класифікація, утилізація-модифікація та кінцева спрямована газифікація полімерної частки ТПВ у вигляді комплексу інноваційних проектів підприємства, спроможного самостійно виробляти енергоресурси. Розглянуто методологічні підходи до реалізації і управління такою комплексу. З огляду на актуальність проекту утилізації ТБО для України, слід продовжити розпочаті дослідження для більш конкретних умов виробництва, асортименту виробів та обладнання з метою розробки реального конкурентоспроможного інноваційного проекту.

Література:

1. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи). Підручник з грифом МОН / Товажнянський Л.Л., Бухкало С.І., Ольховська О.І. та ін. – К.: «Центр учбової літератури», 2016. – 468 с.
2. Бухкало С.І., Ольховська О.І. Основні складові комплексних підприємств енергетичного міксу. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. – X. :НТУ «ХПІ». № 7 (1116), с. 103–108.
3. Бухкало С.І. К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки. Интегрированные технологии и энергосбережение. 2005. № 2, с. 29–33.
4. Бухкало С.І. Изменение свойств в процессе эксплуатации пленки и направления модификация вторичного полиэтилена: дис. канд. техн. наук: 25.01.88 / Бухкало Светлана Ивановна. – М., 1988. – 150 с.
5. Бухкало С.І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи) [текст] підручник. Київ «Центр учбової літератури»: 2014, 456 с.

6. Бухкало С.И. Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов / Интегровані технології та енергозбереження // – Х.: НТУ «ХПІ». 2001. – № 2. – С. 106–112.
7. Бухкало С.И. Деякі властивості полімерних відходів у якості сировини для енерго- і ресурсозберігаючих процесів // Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2014. – № 4. – с. 29–33.
8. Товажнянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухкало С.И. Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах (уч. пособие) / Москва ИНФРА-М, 2015. С. 447.
9. Бухкало С.И. Моделі енергетичного міксу для утилізації полімерної частки ТПВ // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 19 (1191). – с. 23–32.
10. Бухкало С.И., Іглін С.П. Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів / Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 3. – с. 52–57.
11. Бухкало С.И. Інноваційні технології використання відходів. 4-й міжн. конгрес Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 21–23 вересня 2016 р., Львів. 2016, – с. 111.
12. Бухкало С.И., Ольховська О.І. та ін. Об утилизации полимерных отходов как комплексе инновационных проектов. Вісник НТУ «ХПІ». 2012. – Х.: НТУ «ХПІ». № 10, с. 160–166.
13. Бухкало С.И. Структура потоків комплексного підприємства / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжн. н/практ. конф. MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017. // За ред. проф. Сокола Є.І. Ч.ІІІ, – Х.: НТУ «ХПІ», с. 14.
14. Бухкало С.И. Комплексна екологічно-інформаційна безпека проектів підприємства / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжн. н/практ. конф. MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017. // За ред. проф. Сокола Є.І. Ч.ІІІ, – Х.: НТУ «ХПІ», с. 15.

УДК 681.2.08

**ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ
ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ
МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.**

**Яровий І.І к.т.н., ас. каф. ПОіЕМ,
ОНАХТ,**

**THE EXPERIENCE OF DEVELOPING A COMPUTER-INTEGRATED
STAND FOR THE MAINTENANCE OF EXPERIMENTAL STUDIES OF
DEWATERING PROCESSES IN A MICROWAVE-
ELECTROMAGNETIC FIELD ENVIRONMENT.**

**Yarovi I. I. ass., Ph.D.
ONAFТ**

Наукова робота багатьох прикладних галузей, зокрема технологічних наук, включає значну частину експериментальних досліджень серед яких немало експериментальних задач, що пов'язані з реєстрацією зміни в часі комплексу фізичних параметрів. Як правило постановка задачі, планування експерименту та прогнозування і попередня оцінка результатів є суттю дослідницької роботи та визначається саме тематикою і областю досліджень.

Однією з суттєвих проблем, що постає перед науковцями в ході планування циклу експериментальних досліджень, є досяжна для використання база. Вирішення питання побудови вимірювального комплексу "в лоб", пов'язане, як правило, з підбором наявного / доступного апаратного та програмного забезпечення, погодження графіків його використання, подеколи - з отриманням достатньої для використання апаратури кваліфікації. Наявність необхідної апаратури, її потенціальні

можливості, завантаженість та вартість суттєво обмежують "політ думки" багатьох дослідників. Ще гостріше дана проблематика проявляється у студентських дослідженнях.

В той же час, багато тематик експериментальних досліджень, потребують для технічного супроводу, відносно нескладних систем фіксації у реальному часі типового комплексу фізичних величин (температури, вологості, маси, швидкості, переміщення, тощо.). Для таких задач, що не потребують надскладних або вузькоспеціалізованих вимірювальних комплексів, вирішенням питання може стати побудова адаптованого до цілей та задач програмно - апаратного комплексу для супроводу експерименту на базі компонентів класу D.I.Y. (від англ. Do It Yourself — «зроби це сам»), призначенням яких є задоволення потреб аматорів сучасної технічної творчості.

Такий підхід до проблеми має свої переваги. По перше вирішення задачі організації вимірювань переноситься здебільшого з сфери організаційної у сферу творчу, так як основним питанням стає не досяжність готових типових рішень, а принципова можливість отримання бажаної інформації про досліджуваний процес з наявними на ринку компонентами та системами. По друге вартість отриманого рішення може виявитись «супербюджетною» порівняно з класичними варіантами рішень. Наслідком є можливість створення індивідуальних для кожної дослідної установки, постійно діючих, та довільно змінюємих систем моніторингу, без огляду на необхідність передачі апаратури. По третє, використання в якості інтегруючого компоненту спеціального програмного забезпечення дає можливість побудувати малобюджетну (практично безкоштовну) систему моніторингу експерименту з відмінними можливостями візуалізації, архівування та експорту отриманих результатів.

Узагальнюючи підсумки роботи зі створення комп'ютерної системи супроводу експериментальних досліджень процесів зневоднення, після випробування декількох варіантів елементної бази та програмного забезпечення пропонуємо розглянути в якості бюджетного варіанту наступну комбінацію компонентів.

Модуль збору даних (багатоканальний перетворювач сигналів) – одна з мікропроцесорних плат серії «Arduino» з комплектом сумісних датчиків. На сьогодні на ринку наявні датчики (аналогові та цифрові): температури, вологості, атмосферного тиску, освітленості, кольору, електричного струму, наближення (безконтактні), вібрації, сили (деформації), магнітного поля, положення/рівня та інші. Вартість таких пристроїв відповідає найнижчому ціновому діапазону промислових рішень, а метрологічні характеристики цілком забезпечують усереднені вимоги до типових варіантів використання.

Програмування модулю збору даних може здійснюватись як мінімум двома шляхами: використанням штатного середовища «IDE» або програмного комплексу «fProg» - аматорської розробки, доступної для некомерційного використання. Слід зазначити, що перший варіант потребує мінімальних навичок програмування а другий дозволяє створювати алгоритми обробки інформації графічними мовами: функціональними блоками або релейними діаграмами.

Програмне забезпечення для моніторингу фізичних параметрів процесів об'єкту дослідження можна використати різне. Наприклад програму «Terminal.exe» простий у використанні, безкоштовний монітор послідовного порту комп'ютера, що виконує лише функцію реєстрації потоку значень від модулю збору даних в текстовий файл. Можливо використати потужний програмний комплекс «LabVIEW» від компанії «National Instruments», який є стандартом для багатьох дослідницьких лабораторій і дозволяє безкоштовне використання протягом обмеженого часу.

Проте для типових задач оптимальним вибором можна вважати використання SCADA – системи (від англ. Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерське управління та збір даних) — програмного забезпечення, призначеного для моніторингу та керування в реальному часі об'єктом управління. На ринку програм цього класу присутні понад десяток виробників які пропонують різні за масштабом, функціональністю та складністю рішення. Серед пропозицій наявні і безкоштовні (тестові) варіанти (малоканальні, з обмеженою функціональністю або часом роботи). На основі власної, суб'єктивної оцінки можна порадити познайомитись з функціональністю пакетів програм SIMP Light (<http://simplight.ru>) та Simple-Scada (<http://simple-scada.com>). Обидва програмні комплекси відносно прості у вивченні та використанні, обидва мають деякі обмеження (пробні версії), обидва дозволяють максимально простими засобами створити майже повнофункціональну систему моніторингу об'єкту.

Вищезгадані варіанти використовувались автором для вирішення поточних задач моніторингу процесів зневоднення рослинної сировини під впливом мікрохвильового електромагнітного поля. На основі власних спостережень, для комплексу типових фізичних величин, можна порекомендувати наступну комбінацію. Сигнали датчиків (бажано з вихідним сигналом в діапазоні 0-5 В або відповідним перетворювачем) сприймаються платою Arduino: Micro, Uno, Mega – в залежності від бажаної

функціональності та кількості каналів. Програмування плати здійснюється програмою «flprog» (<http://flprog.ru>) мовою функціональних блоків з виводом даних у послідовний порт для наступної реєстрації на ПК програмою «Terminal.exe» і експортом результатів до таблиць «MS Excel», або вивід потоку даних через інтерфейс «RS-485», по протоколу «Modbus» для наступного відображення в SCADA – системі з усіма перевагами візуалізації: віртуальними приладами, трендами та сигналізацією відхилень. В цьому випадку найпростішу інтеграцію забезпечує програма SIMP Light. Приклад інтерфейсу системи моніторингу приведено на мал.. 1.

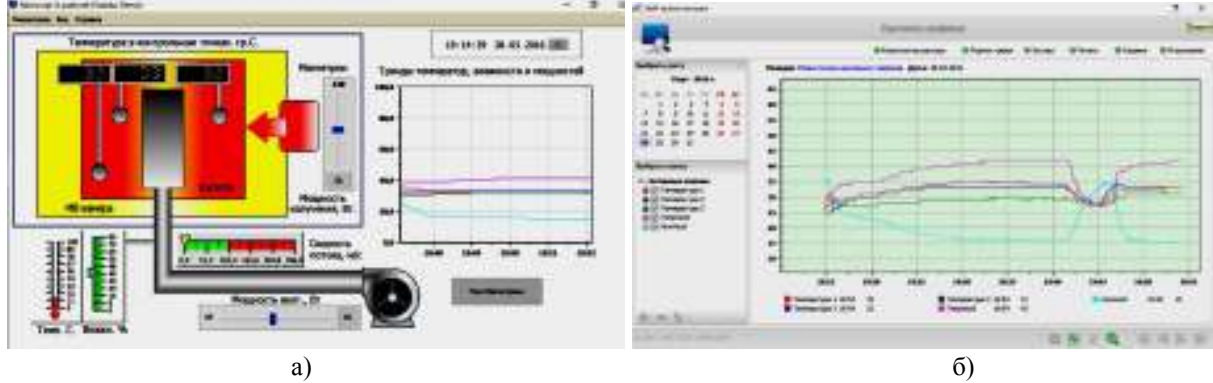


Рис.1. Вікна інтерфейсу SCADA SIMP Light: а) моніторинг параметрів установки; б) графіки трендів контролюємих параметрів.

Висновки.

Запропонована комбінація не є досконалою і вимагає додаткових заходів для реєстрації потоку даних, проте на думку автора є однією з найбільш простих для відтворення і повсякденного використання.

Наведені в тексті марки обладнання та програмних продуктів не є рекламою.

УДК 532.528

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

Иваницкий Г.К., д-р техн. наук, ведущий. научн. сотр.

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

ANALYTICAL INVESTIGATION OF MICROSCOPIC PROCESSES OF HYDRODYNAMIC CAVITATION

Ivanitsky G.K., Dr. Tech. Sciences, leading. Scientific Colleagues

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Аннотация: В настоящей работе освещаются различные аспекты гидродинамической кавитации, включая базовый механизм, анализ динамики единичного пузырька и кавитационного кластера с рекомендациями по оптимальным рабочим параметрам. Разрабатываемые в рамках этого направления технологии и оборудование могут быть использованы в различных отраслях пищевой промышленности.

Abstract: The present work highlights the different aspects of hydrodynamic cavitation including the basic mechanism, bubble dynamics and cavity cluster analysis with recommendations for optimum operating parameters. The technologies and equipment developed within this direction can be used in various branches of the food industry.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, парогазовые пузырьки, кавитационный кластер

Введение. Использование мощных кавитационных механизмов является сегодня одним из наиболее действенных способов достижения высоких энергетических показателей в технологиях, связанных с обработкой жидких дисперсных сред, с целью повышения скорости проведения таких операций, как диспергирование, гомогенизация, экстрагирование, эмульгирование, стерилизация и другие. В последние годы в мире наблюдается тенденция широкого использования гидродинамической и акустической кавитации в пищевых технологиях для ускорения тепломассообменных, гидродинамических, биохимических микроуровневых процессов и для локального энергетического воздействия на структуру сырья и на биологические объекты [1-3]. Обстоятельные обзоры по использованию кавитации в различных отраслях пищевой промышленности и в сельском хозяйстве содержатся в работах [1,3].

Кавитационное воздействие на обрабатываемую среду осуществляется на молекулярном уровне, что позволяет направленно изменять физико-химические свойства продукта, разрушать макромолекулы, мицеллярные структуры и оболочки клеток микроорганизмов, ускорять протекание химических реакций, способствовать образованию свободных радикалов [2,3]. Для рационального решения этих задач необходимо понимание физической природы кавитационных механизмов и возможность их адекватного описания в пространственном и во временном наномасштабах.

Данное аналитическое исследование проведено в плане изучения физической природы кавитационных механизмов, а также для выяснения влияния различных факторов на кинетику протекания процессов кавитации и на характеристики динамических и термических кавитационных эффектов.

Условия инициирования кавитационных процессов. Кавитация – это явление, связанное с образованием, ростом и схлопыванием парогазовых пузырьков в результате последовательного создания в жидкости области пониженного, а затем повышенного давления. В результате схлопывания совокупности пузырьков происходит излучение высокоамплитудных акустических импульсов давления, которые оказывают мощное динамическое и термическое воздействие на окружающую жидкую среду и присутствующие в ней дисперсии и биологические структуры.

Паровые пузырьки стабильно существуют в жидкости при условии, что давление насыщенного пара внутри пузырька $p_{\text{sat}}(T_1)$ превышает действующее на него давление со стороны жидкости p_1 . При нормальных условиях ($p_{10}=0,1$ МПа, $T_{10}=20^\circ\text{C}$) существование паровых пузырьков в воде невозможно. Формирование и рост кавитационных пузырьков при сбросе давления в жидкости связано с наличием в ней микроскопических парогазовых зародышей, содержащих наряду с водяным паром некоторые количество неконденсируемого газа. При заданных значениях p_{10} и T_{10} стабильное существование в жидкости парогазового пузырька с радиусом R_{b0} определяется условием

$$p_{gb0} + p_{\text{sat}}(T_{10}) = p_{10} + 2\sigma/R_{b0}, \quad (1)$$

где $p_{gb0} = f(p_{10}, R_{b0}, T_{10})$ – парциальное давление газа в пузырьке; $\sigma = f(T_1)$ – поверхностное натяжение жидкости. Чем меньше радиус равновесного пузырька R_{b0} , тем парциальное давление газа p_{gb0} выше по сравнению с давлением пара внутри пузырька $p_{vb} = p_{\text{sat}}(T_{10}) = \text{const}$. Очевидно, в жидкости могут стабильно существовать парогазовые пузырьки различного радиуса $R_{b0} = f(p_{gb0})$. При изотермическом расширении или сжатии пузырька и изменении его радиуса от начального значения R_{b0} до R_b давление газа в пузырьке изменяется по закону $p_{gb} = p_{gb0}(R_{b0}/R_b)^3$.

С увеличением давления в жидкости от p_{10} до $p_{11} > p_{10}$ радиус пузырька уменьшится до значения $R_{b1} < R_{b0}$, а парциальное давление газа возрастет до $p_{gb1} = p_{gb0}(R_{b0}/R_{b1})^3$. Капиллярное давление $p_\sigma = 2\sigma/R_{b1}$ повышается, а парциальное давление пара $p_{vb} = p_{\text{sat}}(T_{10})$ остается неизменным. Из (1) следует, что при любом повышении давления p_1 парогазовые пузырьки по-прежнему будут находиться в равновесии с жидкостью, но с меньшим размером.

Совсем иначе ведет себя пузырек в случае понижения давления в жидкости. С уменьшением p_1

радиус R_b увеличивается. Действующее на пузырек капиллярное давление $p_\sigma = 2\sigma/R_b$, снижается пропорционально R_b^{-1} . При этом противодействующее давление газа в пузырьке p_{gb} снижается намного быстрее ($\propto R_b^{-3}$) и, как следствие, давление парогазовой среды внутри пузырька будет определяться преимущественно давлением насыщенного пара $p_{sat}(T_{l0})$. При понижении давления пузырьки могут стабильно существовать в жидкости, пока соблюдается условие равновесия (1).

Равновесие нарушается, когда давление p_l уменьшится до некоторого критического значения $p_l = p_{lcr}$, ниже которого давление парогазовой среды в пузырьке будет превышать давление со стороны жидкости, что ведет к неограниченному росту пузырька.

В акустике при анализе кавитационных явлений критическим (пороговым) давлением называют значение амплитуды акустического давления, вызывающего расширение зародыша до критического размера, после которого он начинает расти взрывообразно.

Величина критического давления p_{lcr} существенно зависит от начального радиуса пузырька R_{b0} . У крупных зародышей ($R_{b0} > 20$ мкм) капиллярное давление $2\sigma/R_{b0}$ изначально невелико, и с увеличением радиуса член $2\sigma/R_b$ в правой части (1) становится пренебрежимо малым, но при этом давление газа в крупном пузырьке p_{gb} остается еще достаточно высоким. Условие неограниченного роста сравнительно крупных парогазовых зародышей определяется неравенством

$$p_{gb0} \left(\frac{R_{b0}}{R_{b2}} \right)^3 + p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr} \quad (2)$$

Неравенство (2) выполняется для p_{lcr} , находящихся в интервале $p_{gb} < p_{lcr} < p_{sat}(T_{l0})$, так что неограниченный рост крупных пузырьков может происходить даже при положительных значениях p_{lcr} .

У зародышей с $R_{b0} \leq 5$ мкм капиллярное давление $2\sigma/R_{b0}$ велико, и остается достаточно высоким при дальнейшем увеличении радиуса R_b . Давление газа p_{gb} в микропузырьках в процессе расширения быстро снижается, и с увеличением R_b член p_{gb} в левой части (1) становится пренебрежимо малым. Условие неограниченного роста парогазовых пузырьков малого размера определяется неравенством

$$p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr} + \frac{2\sigma}{R_{b2}} \quad (3)$$

Из неравенства (3) следует, что критическое давление p_{lcr} должно быть достаточно низким, чтобы компенсировать действие капиллярного давления ($p_{lcr} \leq -2\sigma/R_{b2}$). Поэтому давление p_{lcr} должно находиться в области отрицательных значений, что обеспечивается за счет растяжения жидкости.

На рис.1 представлены рассчитанные по уравнениям (2) и (3) значения p_{lcr} , определяющие начало неограниченного роста парогазовых зародышей в воде в зависимости от их начального диаметра d_{b0} при двух значениях температуры жидкости: $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$ и $T_{l0} = 40^\circ\text{C}$.

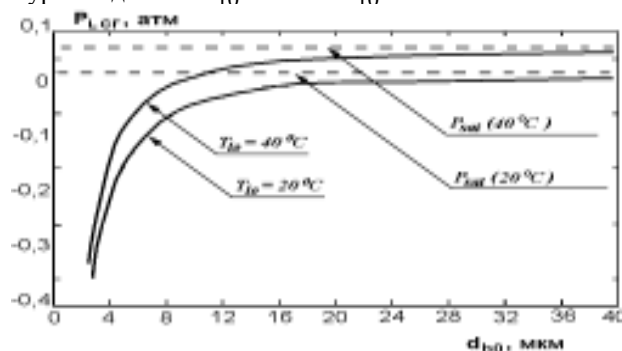


Рис.1– Зависимость критического давления p_{lcr} от диаметра парогазовых зародышей d_{b0}

На рисунке видно, что для инициирования роста зародышей с диаметрами $d_{b0} < 15$ мкм в жидкости нужно создавать отрицательные давления ($p_l < 0$). С повышением температуры T_{l0} рост пузырьков с такими начальными размерами начинается при более высоких давлениях ($p_l > 0$) из-за относительно малого содержания в пузырьках неконденсируемых газов. Для начала роста пузырьков с $d_{b0} \propto 1$ мкм растягивающие напряжения в воде должны достигать значений $p_{lcr} < -2$ атм, а при $d_{b0} \propto 100$ нм значения $p_{lcr} \leq -20$ атм. Как показывает опыт, в обычной воде стабильно присутствуют только пузырьки микронного размера [1,2]. Крупные пузырьки ($d_{b0} > 10$ мкм) быстро всплывают за счет действия архимедовых сил.

Кавитационное воздействие на обрабатываемые жидкие среды обусловлено не единичными пузырьками, а совместным действием полидисперсного ансамбля пузырьков, находящихся в жидкости. По принятой оценке концентрация микророзродышей в обычной воде составляет 10^5 - 10^6 см⁻³. В результате интенсивного роста совокупности зародышей при сбросе давления формируется т.н. кавитационный кластер. Динамические эффекты кавитации определяются условиями развития кластера, как на стадии его роста, так и на стадии коллапса - при одновременном схлопывании всех пузырьков.

Динамика единичного пузырька в качественном и в количественном отношении сильно отличается от динамики пузырька в составе кластера, что зачастую не учитывается при моделировании процессов кавитации. Для описания поведения кластера обычно используют уравнения динамики единичного пузырька без учета силового взаимодействия пузырьков, что вносит недопустимо высокую погрешность. Подробный обзор известных моделей кавитационного кластера содержится в работах [1,4].

Одной из наиболее детально разработанных математических моделей, позволяющих с хорошей точностью прогнозировать поведение кавитационных кластеров при любых режимных параметрах, является модель динамики пузырькового ансамбля (модель ДПА), представленная в монографии [5].

При минимальном числе допущений модель адекватно описывает поведение ансамбля пузырьков в процессе изменении давления в жидкости во всем температурном интервале существования жидкости со строгим учетом кинетики межфазного тепло- и массообмена. Рассматривается силовое взаимодействие пузырьков и рассчитываются текущие параметры нестационарных полей давлений, температур и скоростей в межпузырьковом пространстве жидкости внутри кластера. На стадии схлопывания определяются амплитуды импульсов давления, излучаемых отдельными пузырьками, и акустического импульса, излучаемого кластером, что в конечном итоге, позволяет оценить микро- и наномасштабное энергетическое воздействие кавитационных эффектов на обрабатываемое сырье.

В рамках модели ДПА проведен вычислительный эксперимент по формированию и последующему схлопыванию пузырькового кластера в воде в результате резкого сброса давления до минимального значения $p_{lmin} < p_{sat}(T_{l0})$ и последующего его повышения до конечного значения $p_{lk} \gg p_{sat}(T_{l0})$.

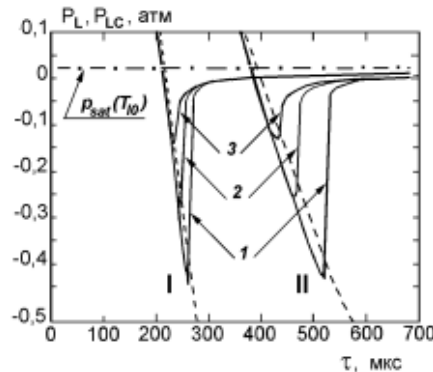
Исследование проведено с целью изучения влияния различных факторов на поведения кластера на всех этапах его развития и на интенсивность сопутствующих кавитационных эффектов. К определяющим факторам относятся такие контролируемые параметры, как температура T_{l0} , минимальное p_{lmin} и конечное давление p_{lk} , длительность сброса давления - $\Delta\tau_1$ и длительность последующего его повышения - $\Delta\tau_2$. В кавитационных технологиях именно вариация этих параметров в реакторе обеспечивает эффективность и выбор оптимальных режимов обработки. Распределение зародышей по размерам $N_b = f(R_{b0})$ в исходной жидкости является неконтролируемым внутренним фактором. Данное исследование проведено при постоянных значениях $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta\tau_1 = 0,65$ мс и $\Delta\tau_2 = 1,5$ мс.

Начальная стадия роста кавитационного кластера. С помощью модели ДПА проанализирована начальная стадия роста парогазовых зародышей с учетом результатов, представленных на рисунке 1

Пусть в воде при нормальных условиях ($p_{l0} = 1$ атм, $T_{l0} = 20^\circ$) находятся парогазовые зародыши с диаметрами $d_{b0} \leq 5$ мкм и с концентрацией $N_b = 10^3$ - 10^6 г⁻¹, где N_b - количество пузырьков в единице массы жидкости, которое в отсутствие коагуляции или дробления пузырьков остается постоянным на протяжении всего процесса. Результаты исследования кинетики роста пузырькового кластера с заданными значениями N_b , R_{b0} , p_{lmin} , p_{lk} , представленные на рис.2 и рис.3, показали следующее.

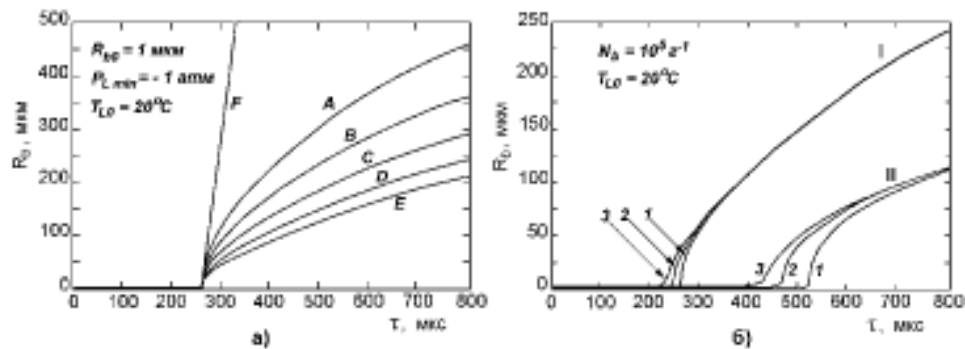
При сбросе внешнего давления p_l до минимального значения $p_{lmin} < p_{lcr}$ давление жидкости p_{lc}

в межпузырьковом пространстве кластера p_{lc} быстро возрастает от $p_{lc} = p_{lcr}$ до $p_{lc} = p_{sat}(T_{l0})$, независимо от последующего понижения внешнего давления $p_l(\tau)$ (рис.2). Кинетика роста отдельных пузырьков внутри расширяющегося кластера будет определяться уже не отрицательным внешним давлением $p_l(\tau) < 0$, как для единичного пузырька, а давлением жидкости в окрестности пузырька $p_{lc} \cong p_{sat}(T_{l0}) > 0$. Время достижения равновесного давления $p_{sat}(T_{l0})$ внутри кластера тем короче, чем выше концентрация N_b . С уменьшением N_b скорость роста пузырьков кластера возрастает (рис.3-а).



R_{b0} : 1 – 1 мкм; 2 – 1,5 мкм; 3 – 2,5 мкм; $N_b = 10^5 \text{ з}$;
 $p_{l0} = 1 \text{ атм}$; $p_{l \min} = -0,5 \text{ атм}$ (I); $p_{l \min} = -3 \text{ атм}$ (II).

Рис.2. Изменение давления в межпузырьковом пространстве кластера $p_{lc}(\tau)$ (сплошные линии) при изменении внешнего давления $p_l(\tau)$ (пунктир) от начального значения p_{l0} до минимального $p_{l \min}$.



Начальное давление $p_{l0} = 1 \text{ атм}$. Минимальное давление $p_{l \min}$: I – -3 атм ; II – $-0,5 \text{ атм}$.

Концентрация N_b : A – 10^2 з^{-1} ; B – 10^3 з^{-1} ; C – 10^3 з^{-1} ; D – 10^5 з^{-1} ; E – 10^6 з^{-1} ; F – единичный пузырек.

Рис.3. Изменение со временем радиуса пузырьков кластера $R_b(\tau)$ при сбросе давления от p_{l0} до $p_{l \min}$.

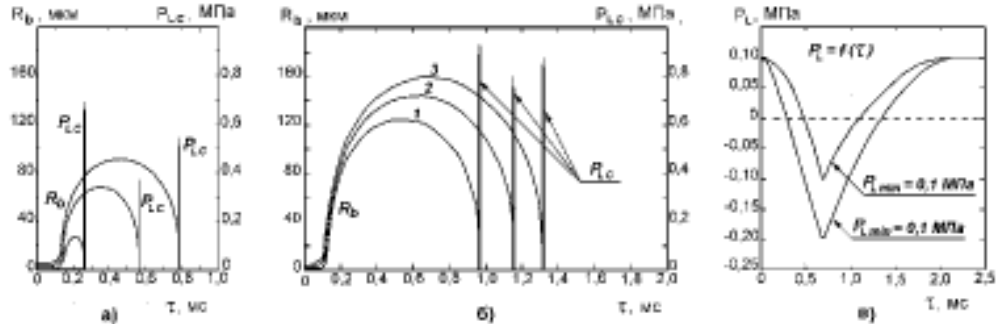
а) в зависимости от концентрации пузырьков кластере N_b ; б) в зависимости от начального размера зародышей R_{b0} и от величины минимального давления $p_{l \min}$.

При сбросе давления до заданного значения $p_{l \min}$ пузырьки, независимо от их начального радиуса R_{b0} , растут до одинакового размера (3-б). Следовательно, к началу сжатия изначально полидисперсного кластера диаметр всех пузырьков в нем будет одинаковым. Пузырьки растут тем интенсивнее, чем ниже значение $p_{l \min}$ (рис.3-б).

Стадия сжатия кавитационного кластера. При последующем повышении внешнего давления p_l от минимального значения $p_{l \min}$ до конечного p_k расширение кластера замедляется. При достижении

условия $p_{lc} > p_{sat}(T_0)$ происходит быстрое сжатие пузырьков кластера, как за счет увеличения давления жидкости внутри кластера ($p_{lc}(\tau) \rightarrow p_l(\tau) \rightarrow p_k$), так и вследствие резкого возрастания капиллярного давления $2\sigma/R_b(\tau)$, которое на завершающей стадии сжатия играет определяющую роль.

Изменение радиуса пузырьков кластера и давления жидкости в межпузырьковом пространстве кластера с момента формирования кластера и до его коллапса представлено на рисунках 3-а,б для двух режимов изменения внешнего давления $p_l(\tau)$, показанных на рис.3-в.

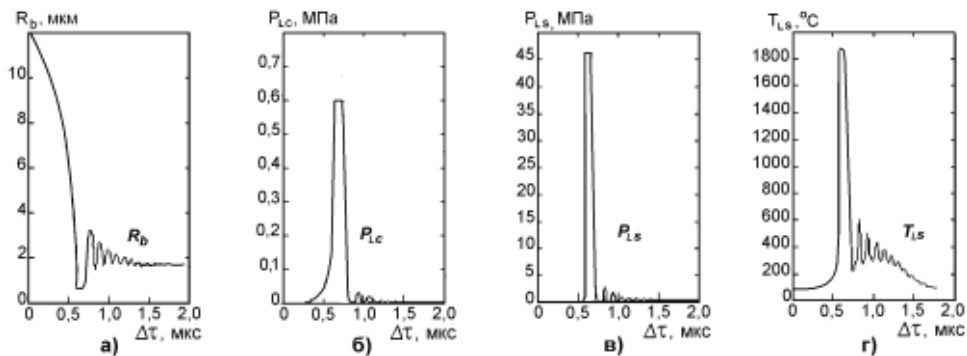


Начальный радиус пузырьков R_{b0} : 1 – 1 мкм; 2 – 1,5 мкм; 3. – 2,5 мкм; $N_b = 10^5 \text{ z}^{-1}$; $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

а) $p_{l\min} = -1 \text{ МПа}$; б) $p_{l\min} = -2 \text{ МПа}$; в) Изменение внешнего давления $p_l = f(\tau)$

Рис.4. Изменение со временем радиуса пузырьков и давления внутри кавитационного кластера в процессе его роста и схлопывания при сбросе давления в жидкости от p_{l0} до $p_{l\min}$.

Сравнение рис.4-а и рис.4-б показывает, что амплитуда импульсов давления внутри кластера $p_{lc}(\tau)$ возрастает с понижением давления разрежения p_l от $-0,1 \text{ МПа}$ до $-0,2 \text{ МПа}$. Это связано с тем, что во втором случае (рис.4-б) пузырьки к моменту их сжатия достигают большего размера и приобретают больший запас потенциальной энергии, которая при схлопывании трансформируется в энергию импульса.



$R_{b0} = 2,5 \text{ мкм}$; $p_{l\min} = -1 \text{ атм}$; $N_b = 10^5 \text{ z}^{-1}$; $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Рис.5. Характер изменения со временем радиуса пузырька (а), давления в межпузырьковом пространстве кластера (б), давления жидкости на границе с пузырьком (в) и температуры жидкости на границе с пузырьком (г) на завершающей стадии схлопывания пузырькового кластера $\Delta\tau$.

На рис.5 показано, как на завершающей стадии схлопывания (в интервале $\Delta\tau = 2 \text{ мкм}$) меняются радиус пузырька $R_b(\tau)$, давление жидкости внутри кластера p_{lc} , давление p_{ls} и температура жидкости T_{ls} на границе с пузырьком. Последние два параметра соответствуют давлению p_b и температуре газа T_b внутри пузырька, которые на стадии схлопывания находятся далеко в закритической области.

На завершающей стадии сжатия радиальная скорость жидкости на границе с пузырьком достигает высоких значений ($v_R = dR_b/d\tau \approx 800 \text{ м/с}$), а величины ускорения $|dv_R/d\tau| > 10^{12} \text{ м/с}$. Возникновение кавитационных эффектов связано с инициированием сферического гидравлического удара на

поверхности предельно сжатого пузырька. В течении времени $\Delta t \approx 50$ нс сжатый пузырек находится в состоянии сверхкритического флюида с температурой $T_b \approx 2000$ К и давлением порядка 45 МПа, а градиент давления в слое жидкости вблизи пузырька достигает 10^9 МПа/м. Столь высокие значения динамических и термических эффектов кавитации достаточны для разрушения не только слабых межмолекулярных связей, но также и более сильных внутримолекулярных энергетических связей. Так для белковой молекулы с молекулярной массой $M = 5 \cdot 10^4$ максимальная инерционная сила, связанная с ускорением жидкости в окрестности схлопывающегося пузырька, равна примерно 650 пН (пиконьютон), тогда как для разрыва С-С связей в длинноцепочечной молекуле требуется 450 пН [6].

С помощью модели ДПА были выполнены комплексные исследования по изучению специфики протекания процессов гидродинамической кавитации в таких устройствах как роторно-пульсационные аппараты [5,7], сопла Вентури [8], центробежные насосы [9,10], пульсационные экстракторы [11], применительно к использованию этих устройств для решения конкретных практических задач, связанных с обработкой жидких сред., в том числе биологического и пищевого сырья. На основе этих исследований разработан ряд высокоэффективных инновационных технологий, в основе которых непосредственно используется возможность направленного кавитационного воздействия на супрамолекулярные структуры - мицеллы, белковые соединения, бактериальные и растительные клетки. К ним относятся технологии, связанные со стерилизацией молока, снижением его кислотности, изменением в нем фракционного состава белков [10], технологии промышленного производства суспензий наноразмерных фосфолипидных везикул, которые сегодня используют в фармакологии, медицине, в пищевой промышленности и в АПК [7,8], энергосберегающие технологии экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья [11].

Выводы. Предлагаемая в данном исследовании методология предназначена для количественной оценки динамических, энергетических и термических характеристик кавитационного кластера, и может рассматриваться как начальный этап при разработке эффективных кавитационных устройств, применительно к созданию инновационных технологий для пищевой промышленности, для обоснования рациональной конструкции кавитационных реакторов и оптимальных режимов их работы.

Литература

1. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011.– Vol. 4, N.6. pp.996–1011.
2. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation - an alternative to ultrasonic food processing // Electronic Journal «Technical Acoustics» (<http://www.ejta.org>), 2010.–N.11.–pp.1–10.
3. Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction //Ultrasonics Sonochemistry.–2011.–Vol.18, pp.813–835
4. Kanthale P.M., Gogate P.R., Pandit A.B., Wilhelm A.-M. Dynamics of cavitation bubbles and design of a hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach. //Ultrasonics Sonochem.–2005.–Vol.12, pp.441–452.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. –Киев: Наук. думка. 2008.–381 с.
6. Wiita A., Ainavarapu S., Huang H., Force-dependent chemical kinetics of disulfide bond reduction observed with single-molecule techniques. //Proc. Natl. Acad. Sci.–2006.–Vol.103, N19.–pp.7222–7227.
7. Авдеева Л.Ю., Иваницкий Г.К. Применение гидродинамической кавитации в технологическом процессе получения фосфолипидных наноструктур. // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. научн. статей.–Киев: «НПБК Трианон», 2011.–вып. 2(7).–С.59–65.
8. Ivanitsky G.K., Avdeyeva L. Y., Makarenko A. A. Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. // Physics of Aerodisperse systems.–2016.– № 53. –pp. 142–151.
9. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Пром. теплотехника.–2011.–Т 34, №2.–С.40–47.
10. Иваницкий Г.К., Шуркова Ю.А., Недбайло А.Е. Использование гидродинамической кавитации для разрушения бактериальных клеток в технологии обработки молока. // Пром. теплотехника.–2012.– Т.34, №3. –С.31–39
11. Иваницкий Г.К. Гоженко Л.П. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа. //Пром. теплотехника.–2014.–Т.36, №6.–С.49–56.

УДК 663.933.061- 027.332:537-962

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ РАСТВОРОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАКУУМ- ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ

Бурдо О.Г., д-р техн.наук, профессор, Ружицкая Н. В., к. т. н.,
Резниченко Т. А., аспирант, Резниченко Д. Н., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

MODELING OF PROCESS OF FOOD SOLUTIONS CONCENTRATION IN MICROWAVE VACUUM EVAPORATOR

Bourdo O.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Ruzhitskaya N.V., Ph.D.,
Reznichenko T. A., Postgraduate Student, Reznichenko D.N. Postgraduate Student
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa

Аннотация: В статье рассмотрены микроволновые технологии интенсификации процессов концентрирования экстрактов ароматических и биологически-активных веществ. Для интенсификации процесса вакуум-выпарки предлагается обеспечить равномерность подвода энергии и исключить промежуточный теплоноситель за счет использования микроволновых технологий. Это основано на том факте, что микроволны действуют в первую очередь на молекулы полярного растворителя, такого как вода. Использование микроволновых технологий может обеспечить объемный подвод энергии к продукту. Приведены результаты экспериментальных исследований концентрирования экстрактов *Stevia Rebaudiana*, кофе, растворов сахара и NaCl. Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа, температура процесса не превышала 50 °С. Установлено, что разница расходов конденсата для рассмотренных растворов незначительна. В качестве модельного раствора использовался раствор сахара. Показано влияние удельного энергоподвода, давления в аппарате, площади поверхности испарения на интенсивность процесса концентрирования пищевых продуктов на примере раствора сахара. Интенсивность процесса оценивалась по среднему расходу конденсата. Скорость протекания процессов выпаривания в условиях микроволнового подвода энергии определяется сложными взаимодействиями многих факторов, учесть которые в одной универсальной для всех случаев модели невозможно. Методом анализа размерностей установлен общий вид критериального уравнения процесса. В общем виде на производительность аппарата по конденсату влияют количество микроволновой энергии, удельная теплота парообразования растворителя, который удаляется, плотность растворителя, площадь зеркала продукта в аппарате, уровень продукта в аппарате, объем продукта, давление в аппарате и окружающей среды. Число энергетического действия, которое устанавливает соотношение мощности микроволнового поля и энергии, которая необходима для перевода растворителя в пар, определяется безразмерным критерием площади и безразмерным давлением в аппарате. В результате обработки экспериментальных данных получены коэффициенты критериального уравнения.

Abstract: In current paper microwave technologies of flavor and biologically active substances extracts concentration intensification are considered. For vacuum evaporation process intensification it is offered to provide energy supply evenness and exclude intermediate heat medium by microwave technologies. It is based on the fact that microwave energy acts directly on molecules of polar solvent, such as water for most dry substances are transparent to radio waves. Use of microwave technology can provide volumetric energy supply to product. The results of experimental researches of coffee, *Stevia Rebaudiana* extracts and sugar and NaCl solutions concentration are given. Laboratory tests were executed at pressure 0,009...0,011 MPa and temperature about 50 °C. It is found out that difference between condensate rates for considered solutions is not essential. Sugar solution of 5% concentration was used as a model solution. The influence of specific energy supply, pressure in the apparatus, evaporation surface area on food products concentration process is shown on the example of sugar solution. The most essential influence on process rate is caused by energy supply and evaporation surface. Process intensity was estimated by condensate average rate. The rate of evaporation processes under microwave energy supply conditions is determined by complex interactions of various factors to

take into account which is difficult in one model suitable for all cases is impossible. General form of process criterion equation is established by the method of dimensional analysis. In general view microwave energy quantity, solvent specific heat of vaporization, solvent density, product mirror surface, product level in apparatus, product volume, pressure in apparatus and environment affect apparatus productivity. Energy action number which determines the ratio of microwave field power and energy that is necessary for solvent conversion to vapour, is determined by dimensionless surface criterion and dimensionless pressure in apparatus. As a result of experimental data processing the coefficients of criterion equation are received.

Ключевые слова: микроволновое поле, вакуум-выпарные аппараты, сахарные растворы, стевия.

Keywords: microwave field, vacuum evaporators, sugar solutions, stevia.

Процесс выпарки является ключевым в технологиях целого ряда пищевых продуктов. Известно, что теплопроводность пищевых продуктов (соки, экстракты) с увеличением содержания сухих веществ понижается. За счет этого в большинстве существующих выпарных аппаратов не обеспечивается равномерный подвод энергии к продукту, что ведет к его «пригоранию», т.е. термическому повреждению, а также снижает энергетическую эффективность процесса [1].

В то же время низкие температуры обработки не позволяют инактивировать всю патогенную микрофлору в продукте, что снижает сроки его хранения и вынуждает использовать консерванты. Ряд работ подтверждает эффективность низкотемпературной пастеризации и стерилизации пищевых продуктов в микроволновом поле [2]. Кроме того микроволновое поле, воздействуя на полярные молекулы сырья (вода, этанол и т.п.) инициируют особый бародиффузионный поток экстрактивных веществ из микро- и наноструктур сырья в экстрагент. За счет явления бародиффузии разрушаются

клеточные стенки сырья, а также турбулизуется пограничный слой [3].

При концентрировании выпариванием проблему равномерности подвода энергии также можно решить с использованием микроволновых технологий.

При микроволновом подводе энергия подводится непосредственно к молекулам воды в продукте, так как сухие вещества как правило радиопрозрачны. Очаги парообразования возникают во всем объеме и выполняют функцию греющей поверхности. Таким

образом площадь поверхности теплообмена должна возрастать на порядки. Реализуется схема подвода

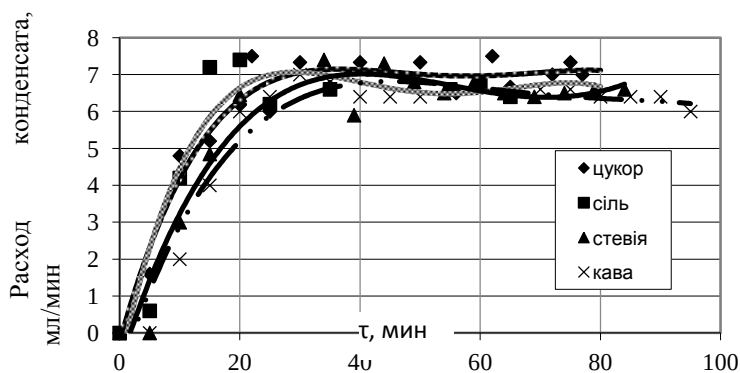


Рис. 1. Зависимость расхода конденсата от характера раствора

образом площадь поверхности теплообмена должна возрастать на порядки. Реализуется схема подвода энергии, показавшая высокую эффективность в технологиях сушки [4, 5].

Технологии микроволновой вакуум-выпарки были применены для концентрирования экстрактов стевии *Stevia Rebaudiana* – природного сахарозаменителя, кофейного экстракта, растворов сахара и NaCl (рис. 1). Эксперименты проводились при давлении 0,009...0,011 МПа, температура процесса не превышала 50 °С.

Как видно из графиков, разница расходов конденсата для рассмотренных растворов незначительна. Таким образом модельным раствором для изучения влияния на кинетику концентрирования таких факторов как давление в аппарате, удельный энергоподвод, площадь поверхности испарения в аппарате был выбран сахарный раствора начальной концентрацией 5 %.

Отмечено, что во всех опытах расход конденсата в течение 10...20 минут достигал постоянных значений, т.е. установка выходит на стационарный режим. Таким образом наглядно оценить влияние параметров процесса на интенсивность концентрирования можно введя понятие среднего расхода конденсата (рис. 2).

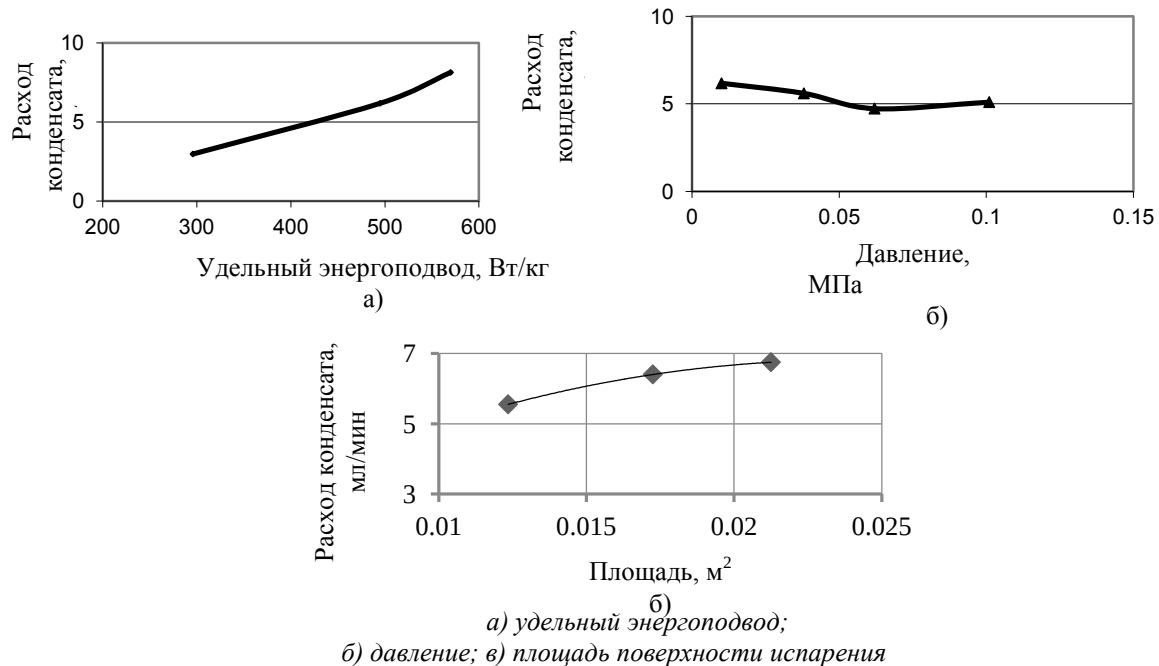


Рис. 2. Влияние параметров процесса на средний расход конденсата:

Исследование влияния удельного энергоподвода проводилось при давлении 0,009 МПа и площади зеркала 0,02 м². Изучение влияния давления в аппарате и площади поверхности испарения проводилось при удельном энергоподводе 495 Вт/кг. Установлено, что увеличение поверхности испарения при постоянном объеме продукта ведет к увеличению расхода конденсата.

Полученная база экспериментальных данных была использована для построения математической модели процесса.

Скорость протекания процессов выпаривания в условиях микроволнового подвода энергии определяется сложными взаимодействиями многих факторов, учесть которые в одной универсальной для всех случаев модели невозможно.

Получить структуру критериального уравнения для расчета микроволновых вакуум-выпарных аппаратов периодического действия можно методом анализа размерностей [6].

В общем виде на производительность аппарата по конденсату v влияют количество микроволновой энергии N , удельная теплота парообразования растворителя, который удаляется r , плотность растворителя ρ , площадь зеркала продукта в аппарате S , уровень продукта в аппарате h , объем продукта V_{np} , давление в аппарате и окружающей среды P и P_0 . Тогда получаем следующую зависимость в общем виде:

$$v = f(N, r, \rho, S, h, V_{np}, P, P_0). \quad (1)$$

Перечень параметров приведен в табл. 1. Все параметры состоят из трех основных размерностей: длины (м), массы (кг) и времени (с). Используя метод анализа размерностей можно функцию (1) заменить зависимостью между критериями подобия. Согласно π -теореме определяем количество безразмерных комплексов, которые описывают процесс. Поскольку число переменных $n = 9$, число единиц измерения $m = 3$, количество безразмерных комплексов, которые описывают процесс равняется $(n - m) = 6$.

Табл. 1. Список параметрів

Параметр	Символ	Розмірність
Производительность установки по конденсату	v	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
Плотность растворителя	ρ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Площадь поверхности продукта	S	м^2
Уровень продукта в аппарате	h	м
Давление в аппарате	P	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Базовое давление	P_0	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность микроволнового поля	N	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Объем продукта	V_{np}	м^3
Удельная теплота парообразования растворителя	r	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$

Приведем функцию в степенном виде:

$$v = A N^a r^b \rho^c S^d h^e V_{np}^f P^g P_0^n. \quad (2)$$

Составляем уравнение размерностей:

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} \right)^a \cdot \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right)^b \cdot \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)^c \cdot (\text{м}^2)^d \cdot (\text{м})^e \cdot (\text{м}^3)^f \cdot \left(\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^g \cdot \left(\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^n \quad (3)$$

Составляем матрицу размерностей для уравнения (2):

Таблица 2. Матрица размерностей

	a	b	c	d	e	f	g	n	v
м	2	2	-	2	1	3	-	-	3
кг	1		1				1	-	0
с	-	-					-	-	-
	3	2					2	2	1

Составляем систему уравнений для основных единиц:

$$\begin{cases} \text{кг} & 3 = 2a + 2b - 3c + 2d + e + 3f - g - n \\ \text{м} & -1 = -3a - 2b - 2g - 2n \\ \text{с} & 0 = a + c + g - n \end{cases}$$

В этой системе 8 неизвестных. Любые три из них можно выразить через четвертую. Так во втором уравнении выражаем через остальные множители:

$$n = a + c + g.$$

Из третьего уравнения найдем e , и подставив d получаем:

$$b = -2,5a - 2g - c + 0,5.$$

Из первого уравнения:

$$e = 2 + 2a + 2g + 4c - 2d - 3f.$$

Перепишем уравнение (2) в следующем виде:

$$v = A \cdot N^a \cdot r^{-2,5a-2g-c+0,5} \cdot \rho^c \cdot S^d \cdot h^{2+2a+2g+4c-2d-3f} \cdot V_{np}^f \cdot P^g \cdot P_0^{a+c+g}. \quad (4)$$

Объединяем параметры по одинаковым показателям степени:

$$v \cdot r^{0,5} h^2 = A \cdot \left(\frac{N \cdot h^2 \cdot P_0}{r^{2,5}} \right)^a \cdot \left(\frac{\rho \cdot h^4 \cdot P_0}{r} \right)^c \cdot \left(\frac{S}{h^2} \right)^d \cdot \left(\frac{V}{h^3} \right)^f \cdot \left(\frac{P \cdot P_0 \cdot h^2}{r^2} \right)^g \quad (5)$$

Комплексы, полученные в уравнении (5) используем для поиска комбинаций, которые дадут структуру критериального уравнения.

$$\frac{h^2 \cdot r^{0,5}}{v} \cdot \frac{N \cdot h^2 \cdot P_{\delta}}{r^{2,5}} \cdot \frac{r}{\rho \cdot h^4 \cdot P_{\delta}} = \frac{N}{v \cdot r \cdot \rho} = Bu. \quad (6)$$

$$\left(\frac{S}{h^2}\right) \cdot \left(\frac{h^3}{V}\right) = \frac{S \cdot h}{V} = F. \quad (7)$$

Комплекс F – учитывает влияние площади поверхности парообразования.
Влияние давления учитывается комбинацией:

$$\left(\frac{P \cdot P_{\delta} \cdot h^2}{r^2}\right) \cdot \left(\frac{P_{\delta}^2}{r^2}\right) = \frac{P}{P_{\delta}} \quad (8)$$

Таким образом применяя числа подобия получаем следующее уравнение:

$$Bu = A \cdot (F)^n \cdot \left(\frac{P}{P_{\delta}}\right)^m, \quad (9)$$

Константы A, n, m определяются экспериментально.

Обработка массива экспериментальных данных позволяет рекомендовать для расчета процесса выпаривания в микроволновом вакуум-выпарном аппарате следующее уравнение:

$$Bu = 4,326 \cdot F^{-1,93} \cdot \left(\frac{P}{P_{\delta}}\right)^{0,12} \quad (10)$$

Выводы. В технологиях концентрирования экстрактов микроволновый подвод энергии позволяет добиться равномерности подвода энергии к продукту в выпарном аппарате и исключить промежуточный теплоноситель. При этом энергия подводится непосредственно к воде (полярному экстрагенту) в продукте.

За счет того, что по всему объему выпариваемого продукта возникают очаги парообразования, на порядок возрастает поверхность теплообмена в аппарате. Температура выпариваемого продукта зависит не только от давления в аппарате, но и от количества подведенной микроволновой энергии и может значительно превышать температуру кипения. В то же время, интенсивное испарение воды из продукта в условиях микроволнового подвода энергии происходит при общей температуре раствора ниже температуры кипения растворителя. На интенсивность испарения помимо энергоподвода и давления также оказывает влияние площадь поверхности испарения.

Структура критериального уравнения определена методом анализа размерностей. Число энергетического действия, которое устанавливает соотношение мощности микроволнового поля и энергии, которая необходима для перевода растворителя в пар, определяется безразмерным критерием площади и безразмерным давлением в аппарате. В результате обработки экспериментальных данных получены коэффициенты критериального уравнения. Наибольшее влияние на интенсивность выпаривания оказывают мощность микроволнового поля и площадь поверхности испарения.

Литература

1. Бурдо О.Г. Исследование вакуум-выпарных аппаратов нового типа [Текст] / Бурдо О.Г., Ружицкая Н.В., Макаренко Т.А., Малашевич С.А. // Наукові праці ОНАХТ. – Вип. 45, Т.2. – Одеса, 2014. – С.212–214
2. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле [Текст]. – О. : Полиграф, 2010. – 200 с.
3. Бурдо, О.Г. Экстрагирование в системе «кофе-вода»: моногр. [Текст] / О.Г. Бурдо, Г.М. Ряшко. – О.: ТЕС, 2007. – 176 с.
4. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. [Текст] – Одесса: «Полиграф», 2010. – 368 с.
5. Бурдо О.Г. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии [Текст] / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. // Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные

- энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 - 426.
6. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. [Текст] – Одесса: Друк, 2008. – 348с.
7.
УДК 532.135

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ
РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК**
магістрант Гоцький Я. Г., к.т.н, ст. викл. Двойнос Я. Г., Національний
технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

**MATHEMATICAL MODEL OF HOMOGENIZATION MELT
COMPOSITION POLYETHYLENE - RUBBER**
undergraduate Hotskij Y.G., Ph.D., senior lecturer Dvoinos Y.G.,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

***Анотація.** Робота присвячена моделюванню процесу змішування та диспергування силіконового каучуку з розплавом поліетилену з у робочих зазорах одночервячного екструдера та зазорах змішуючого спірального елемента Маддока. Присвячено увагу технологічності елемента змішуючого, та інтеграції методів формування до геометричних умов фізичної моделі, що дозволяє наблизити розрахунки до реальної конструкторської розробки. Проведено аналіз відомих гідродинамічних моделей та методів визначення якості змішування за накопиченою деформацією.*

Відповідно до технології переробки композиції обґрунтовано вимоги до якості змішування та температури розплаву, що дозволило сформулювати критерій якості процесу та мету моделювання: встановлення залежностей якості процесу змішування від основних геометричних параметрів інструменту.

В результаті чисельного експерименту отримано критичні параметри, які можуть бути використані при проектуванні екструзійного обладнання.

Робота в першу чергу зацікавить інженерів-конструкторів екструзійного та нестандартного обладнання для переробки полімерних матеріалів.

Abstract. The work is devoted to modeling the process of mixing and dispersion of silicone rubber with molten plastic from working in the gaps and gaps one screw extruder mixing spiral element Maddoka. Attention is paid to the technological element of the mixing and integration methods of forming geometrical conditions to the physical model, allowing calculations to approximate the real design project. The analysis of known hydrodynamic models and methods for determining the quality of mixing accumulated strain.

According to the technology of processing compositions justified demands for quality mixing and temperature of the melt-themes, which allowed formulating quality criteria and objective process modeling: depending installation as the mixing of basic geometric parameters of the tool.

As a result of numerical experiments obtained characteristic equation may be use the design of extrusion equipment.

Working primarily interested in design engineers and non-standard extrusion equipment processing of polymeric materials.

Ключові слова: каучук з силікону, індекс перемішування, розплав поліетилену, екструдер, черв'як екструдера.

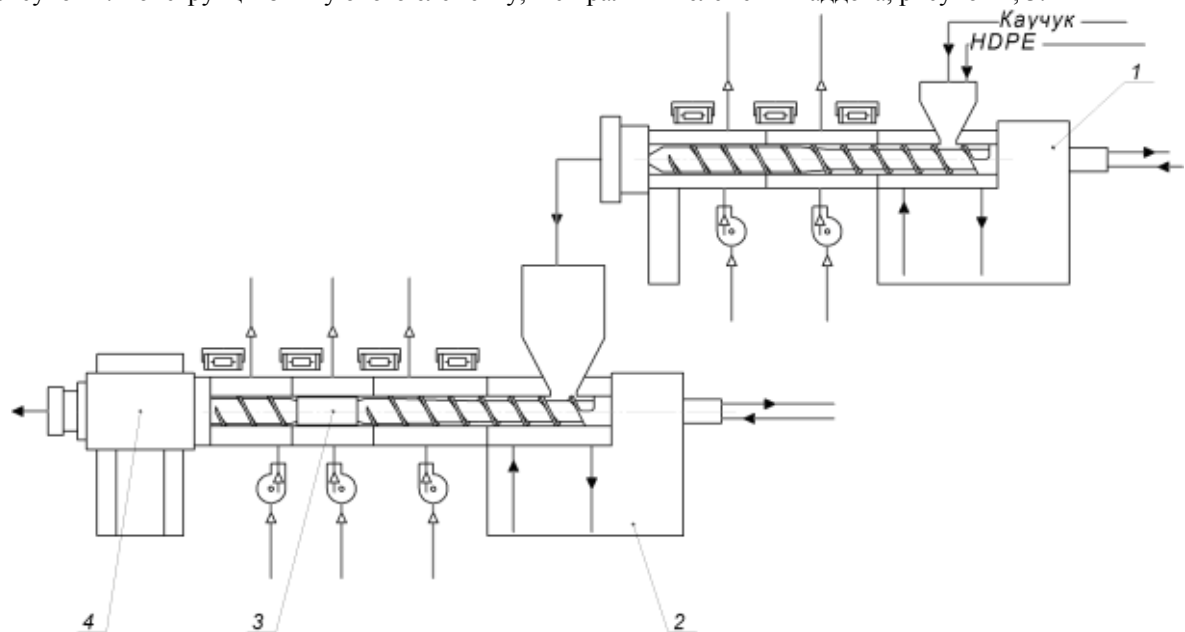
Keywords: rubber silicone, mixing index, melt plastic, extruder, extruder screw.

Переробка та створення нових композицій на основі полімерів є актуальним, оскільки ці матеріали отримують кращі експлуатаційні характеристики, а саме, при незначному додаванні каучуку до полімеру збільшуються механічні характеристики отриманої композиції, такі як еластичність, удароміцність та морозостійкість. Світова компанія DuPont використовує концентрати з первинними амідами жирних кислот на основі рослинної сировини для отримання композиції з низьким коефіцієнтом тертя.

Каучук з силікону марки СКТН [1] Запорізького державного підприємства "Кремнійполімер" разом з МФСН-В (затверджувач і стабілізатор) та поліетиленом утворюють композицію з антифрикційними властивостями, які дозволяють використати новий матеріал як антифрикційне покриття внутрішньої поверхні труб захисних з поліетилену для монтажу оптоволоконних кабелів зв'язку. Перевага силіконових добавок у стабільності властивостей, – полімеризований високомолекулярний силіконовий каучук не розчиняється у поліетилені, і відповідно, не мігрує в середину стінки труби. Крім того, температура менше впливає на коефіцієнт тертя. Відомий мастербатч Dow Corning® MB25-035 фірми DOW CORNING на основі силікону.

Традиційно, технологія екструзії таких композицій передбачає створення гранульованого концентрату, який у екструдері внутрішнього шару перемішується з основним матеріалом. Відповідно, концентрат містить значно більшу концентрацію адитивів.

Процес виробництва поліетилен-каучукових композицій є складним оскільки важко досягти рівномірного розподілу каучуку по всьому об'єму матеріалу. Основним обладнанням виробництва концентратів є двочерв'ячний або осцилюючий екструдер, – це обладнання має високі показники змішування та диспергування. На підприємстві ТОВ "Технопласт", м. Боярка впроваджено технологію виготовлення композицій поліолефінів з силіконовим каучуком за наступною технологічною схемою, рисунок 1. Конструкція змішуючого елементу, – спіральний елемент Маддока, рисунок 2, 3.



1 – екструдер одночерв'ячний №1 (механічно перетирає суміш); 2 – екструдер одночерв'ячний №2;
3 – змішуючий елемент екструдера; 4 – гранулююча головка.

Рисунок 1. Технологічна схема виробництва гранульованого концентрату поліетилену з силіконовим каучуком

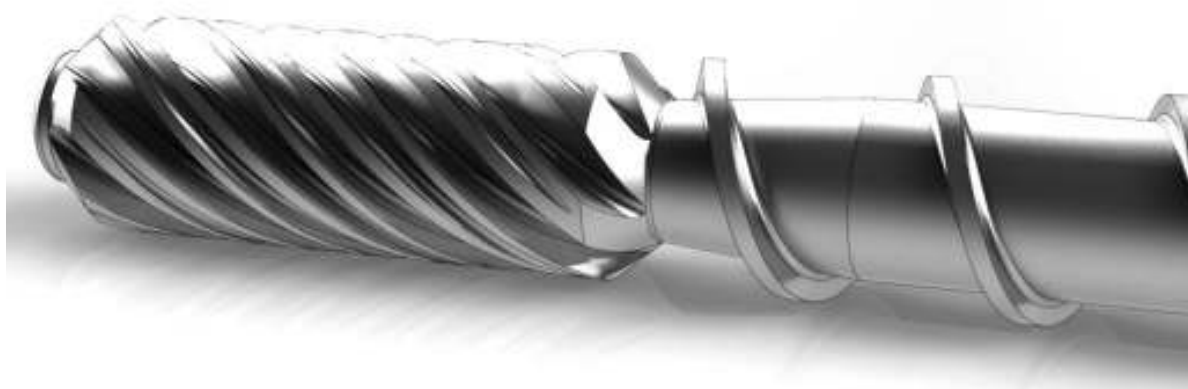
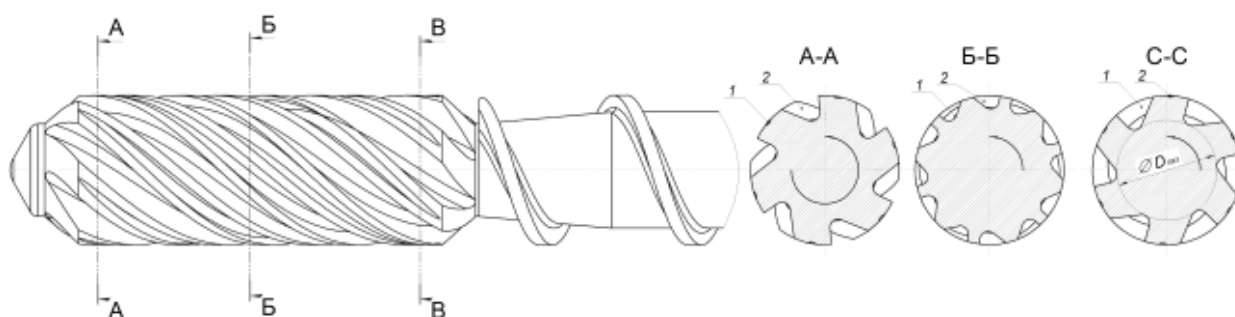


Рисунок 2. Зовнішній вигляд спірального елемента Маддока

Перевагою спіральної форми елемента Маддока є більша довжина зазору, через який має переміститись полімерна композиція, що забезпечує зменшення тиску у напірних каналах (позиція 1 рисунку 3).



1 – канал напірний (перед робочим зазором); 2 – канал відводу (після робочого зазору);

Рисунок 3. Креслення спірального елемента Маддока

Спростивши модель спірального елемента до звичайного, у якого довжини зазорів однакові, рисунок 4.

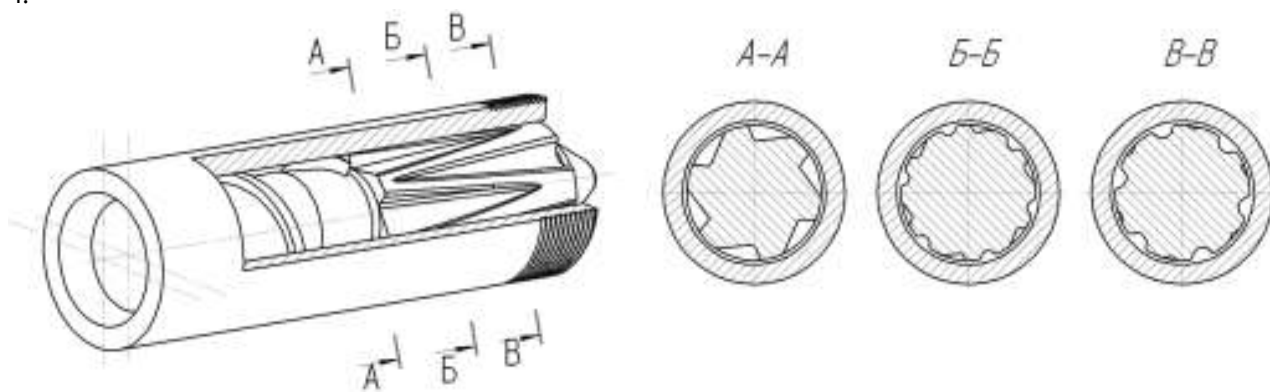
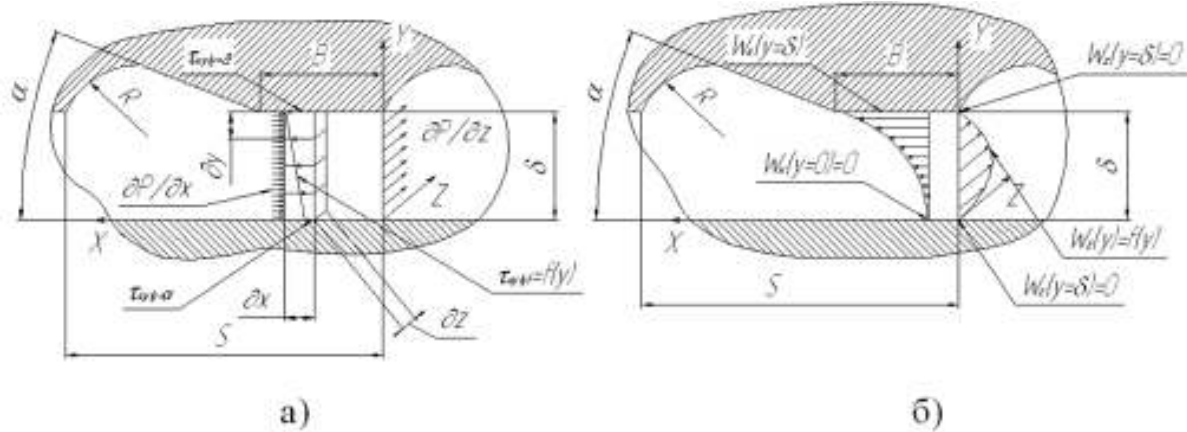


Рисунок 4. Схема змішувальної секції екструдера, еквівалентної спіральному елементу Маддока

На рисунку 5 зображено фізичну модель процесу змішування розплаву полімеру у каналі насадки шнека одночервячного екструдера.



а – геометричні умови та сили, що діють на розплав полімеру;
б – граничні умови швидкості потоку.

Рисунок 5 – Фізична модель процесу змішування полімеру в змішувальній секції екструдеру

Рух розплаву полімеру в каналі насадки шнека є складним, тому для визначення ефективної в'язкості

μ_{ef} використовується другий інваріант швидкості зсуву: $\mu_{ef} = \mu_0 \left(\frac{I}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}$, де μ_0 – в'язкість при нульовому зсуву; I – другий варіант тензора швидкостей деформації; n – реологічна константа:

$$I_{II} = 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right].$$

Зробив припущення плоско паралельної моделі отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на розплав у робочих зазорах насадки:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}; \quad \tau_{xz} = \mu_{ef} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad \tau_{yz} = \mu_{ef} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

де μ_{ef} – в'язкість ньютонівської рідини; v – швидкість потоку; τ_{xz} , τ_{yz} – напруження зсуву.

Критерієм якості змішування є величина накопиченої деформації зсуву: $\bar{\gamma} = \dot{\gamma} t$. Середня швидкість

зсуву: $\bar{\gamma} = \frac{1}{b\delta} \int_0^{\delta} \int_0^b \frac{I_{22}}{2} dx dy$, де b – довжина елемента насадки, м. Середній час перебування частинок

розплаву: $t = \frac{V}{Q}$, де V – об'єм апарату, м³; Q – витрати, м³/с.

Висновок: геометричні умови течії композиції розплаву у клиновому зазорі напірного каналу викликають появу додаткового гідралічного тиску, що дозволяє зменшити значення робочого зазору при збереженні продуктивності змішуючого елемента та уникнути проковзування розплаву по стінках каналу. Ефективність роботи спірального елемента Маддока напряму залежить від напірної характеристики екструдеру та швидкості обертання черв'яка, однак має межу, обумовлену перегрівом розплаву та початком механодеструкції $\dot{\gamma} \geq 500 \text{ s}^{-1}$ (температура композиції на вході в зазор 200°C, після зазору – 270°C).

Перелік посилань:

1. <http://silic.com.ua/index.php?Lev=silicone-rubbers> (дата звернення: 17.05.2017).
2. <http://www.extrusionwiki.com/wiki/2003BestPaper.ashx> (дата звернення: 17.10.2016).
3. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – 240 с., ил.

УДК 621.74:541

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Бурдо О.Г., Давар Ростами Пур, фирма «D.R.P.», Teheran, Iran

MATHEMATIC MODEL OF THE DIRECTED CRYSTALIZATION PROCESS

Burdo O.G., Davar Rostami Pur, «D.R.P». Company, Tehran, Iran

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции на рынке соков. Анализируются перспективы гранатового сока в Украине. Сравниваются современные технологии концентрирования соков. Показаны преимущества низкотемпературных методов концентрирования. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения концентрированного гранатового сока.

Abstract: World trends in the juice market are considered. Prospects for pomegranate juice in Ukraine are analyzed. Modern juice concentration technologies are compared. The advantages of low-temperature concentration methods are shown. The prospects of block freezing technologies for obtaining concentrated pomegranate juice have been substantiated.

Ключевые слова: гранатовый сок, концентрирование сока, низкотемпературные методы концентрирования, технологии блочного вымораживания.

Key words: pomegranate juice, juice concentration, low temperature concentrating methods, block freezing technology.

Исследование литературных источников и формулировка проблемы

Представляется, что важным параметром, определяющим эффективность процесса блочного вымораживания, является форма кристаллизаторов и их компоновка в емкости концентратора. Первые конструкции блочных вымораживателей использовали эффект «термического парадокса» и состояли из пучка стержневых испарителей [1], расположенных коридорным либо шахматным пучком (рис.1,а). В дальнейшем [2] была предложена оригинальная форма испарителей (рис.1,б), которые предназначались для более полного заполнения льдом емкости. В установках большой производительности использовались пластинчатые кристаллизаторы [3], которые оказались удобными и в монтаже, и при эксплуатации (рис.1,в). Однако во всех этих конструкциях объем балластной жидкости (а) в емкости оставался значительным. А это не позволяло серьезно повышать концентрацию раствора. Вообще, задача оптимизации компоновки аппарата блочного вымораживания серьезно не ставилась.

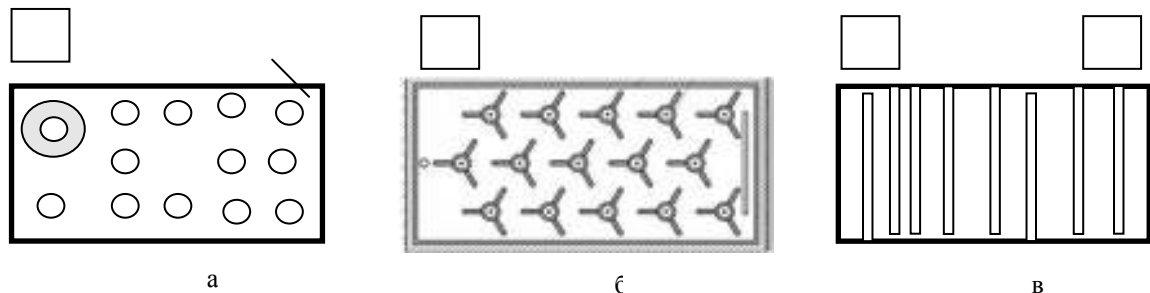


Рис. 1. Схемы компоновок испарителей.

Общими при экспериментальном исследовании различных по конструктивному исполнению испарителей [1 - 3] оказались закономерности формирования блока льда и структуры раствора в процессе криоконцентрирования. Несмотря на то, что рост массы льда (M_l) во времени снижается и имеет вид выпуклой экспоненты (рис.2,а), характер роста концентрации раствора (X_p) во времени выглядит параболой (рис.2, б). При этом при приближении отношения объемов льда (V_l) и исходного раствора (V_p) к 1, скорость роста X_l стремительно повышается. Этот факт был отмечен авторами [3] и дал основание считать, что конструкция аппарата должна реализовывать такие возможности.

На основе проведенного анализа в данной работе выдвигается научное положение: «При использовании плоско - параллельных кристаллизаторов рациональное соотношение шага между

кристаллизаторами, компоновка аппарата (расстояния от торцов кристаллизатора до стенок емкости и дна), могут обеспечить максимальную степень концентрирования раствора при снижении термического сопротивления системы поверхность кристаллизатора - раствор за счет организации направленной кристаллизации, которая проходит при росте площади поверхности раздела фаз».

Естественно, необходимым условием реализации выдвинутой гипотезы является согласование конструктивных параметров испарителей и концентраторов с режимными характеристиками процесса.

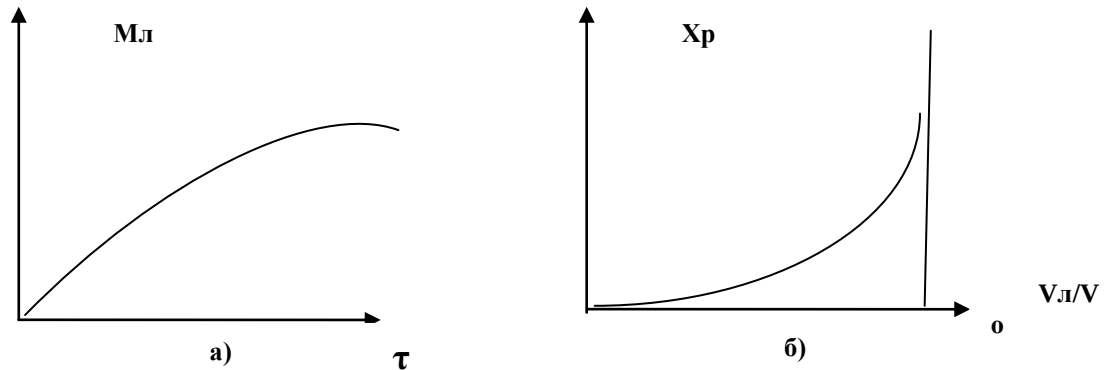


Рис.2. Типичные картины кинетики: формирования массы льда (а) и изменения концентрации раствора (б).

Вторая идея научного положения связана с предложением организовать процесс кристаллизации льда с нарастанием внешней поверхности блока льда. Это приведет к росту поверхности фазового контакта и будет способствовать реализации эффекта «термического парадокса», суть которого для стержневых кристаллизаторов изложена авторами [1, 3].

Результаты исследований. В настоящей работе впервые предлагается использовать идею «термического парадокса» для пластинчатых кристаллизаторов. Иллюстрация этого положения дана на рис.3. Показано, что работает не только фронтальные поверхности кристаллизатора, но и торцевые. При этом, аппарат проектируется так, чтобы расстояния от боковых торцов до стенок емкости кристаллизатора, и от нижнего торца до дна емкости равнялись конечному значению толщины блока льда (δ). Тогда (рис.3) высота блока льда станет $(L + \delta)$, а ширина – $2(B + \delta)$. А в прежних конструкциях она рассматривалась равной высоте кристаллизатора (L).

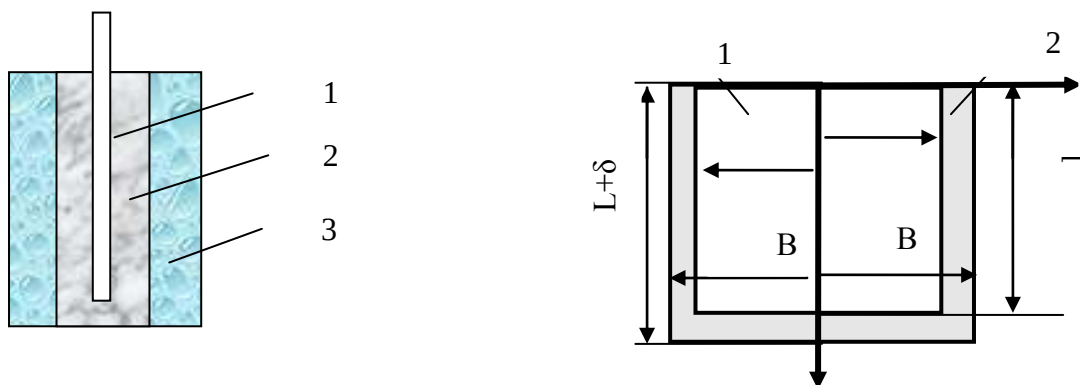


Рис. 3. Постановка задачи моделирования: а – физическая модель; в – геометрическая модель (1 – поверхность испарителя, 2 – поверхность льда).

Теплофизическая модель предлагаемого решения приведена на рис.4.

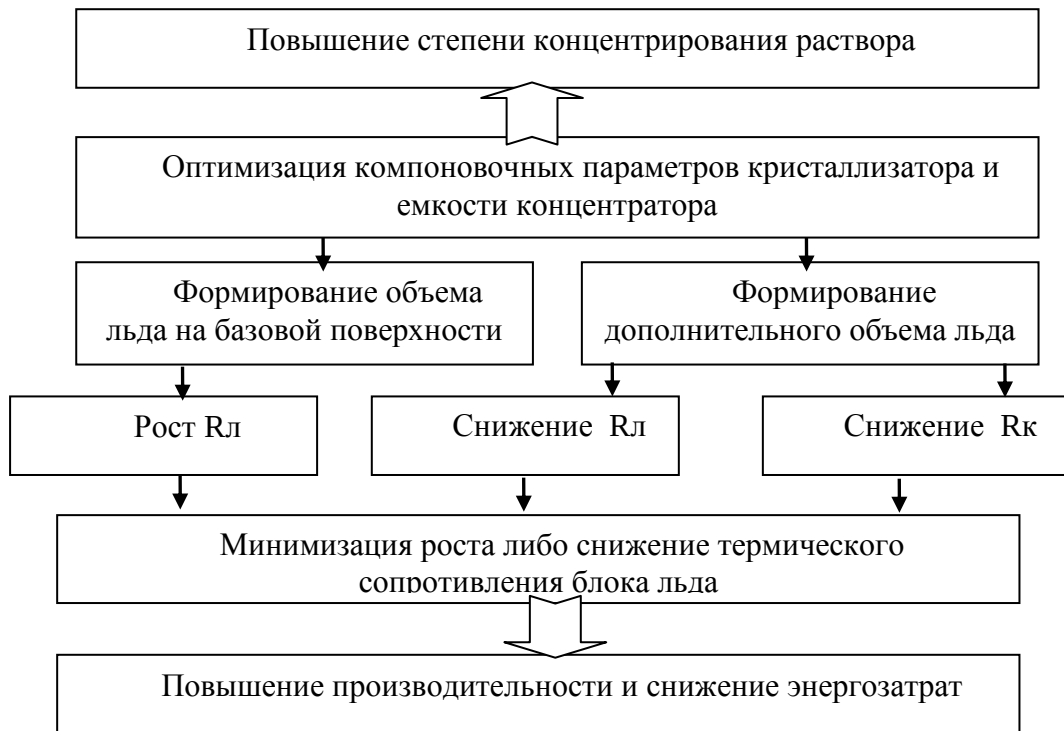


Рис.4. Теплофизическая модель предлагаемого блочного вымораживателя.

Таким образом, предлагаемое решение сохраняет достоинства пластинчатых испарителей (их технологичность и высокая производительность) и использует эффект «термического парадокса». Проведем анализ термических сопротивлений по схеме (рис.4). Та часть объема льда, которая растет на фронтальной поверхности испарителя, имеет традиционные недостатки: с повышением толщины слоя его термическое сопротивление (R_l) растет. Однако организуется кристаллизация и на торцевых поверхностях испарителя, формируется дополнительный объем льда, который характеризуется ростом внешней поверхности. А это – предпосылки к снижению термического сопротивления конвективного теплообмена (R_k) и термического сопротивления твердой фазы (R_l). В результате появляется возможность достижения максимальной степени концентрирования раствора, снижения времени процесса и энергетических затрат при сохранении большой производительности аппарата.

Рассмотрим методы аналитического моделирования кинетических зависимостей блочного вымораживателя.

Параметрическая модель. Сводку всех ключевых факторов, определяющих гидродинамические, теплообменные и диффузионные взаимодействия в аппарате, включает параметрическая модель (рис.5).

Особенности сырья определяют: теплоемкость (c_s), плотность (ρ_s), теплопроводность (λ_s) и вязкость (ν_s). Исходной информацией является: масса загружаемого сока (G_c), его температура (t_n) и концентрация (X_c). Характер процесса вымораживания определяют: удельная теплота кристаллизации (Ω_v) и криоскопическая температура ($t_{кр}$) и толщина блока льда (δ_l).

Основные характеристики аппарата: толщина (v), высота (L), и половина ширины испарителя (B), шаг между ними (s) и их число (z), объем загружаемого продукта (V_n). Параметры холодильной системы (ХС): потребляемая электрическая мощность (N_e), температуры кипения (t_o) и конденсации (t_{kd}) и электрический холодильный коэффициент (η_e).

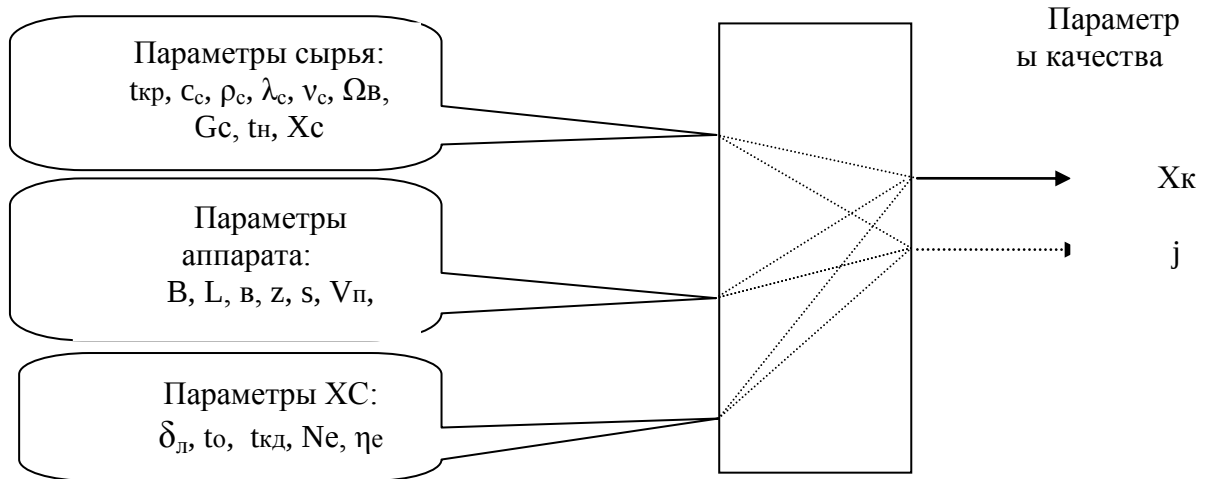


Рис.5. Параметрическая модель блочного вымораживателя.

Параметрами качества считаем значение конечной концентрации сока (X_k) и удельные расходы энергии (j , Дж/кг готового продукта). Задача дальнейших исследований – установить взаимные связи между комплексами этих параметров.

Модель термического парадокса. Проведем анализ теплопередачи при работе инновационной установки блочного вымораживания. Суммарное значение термического сопротивления всей цепочки теплопередачи «раствор – поверхность блока льда – лед – контакт блока с испарителем – стенка испарителя – кипение холодильного агента» определяется (рис.2.4) по последовательно – параллельной схеме. Можно исключить из анализа термические сопротивления контакта и процесса кипения, которые в процессе вымораживания остаются неизменными и имеют низкие значения. Суммарное термическое сопротивление (R_c) определяется последовательной цепочкой «блок льда (R_l) – конвекция от раствора к поверхности льда (R_k)». В самом блоке льда тепловые потоки проходят (рис.2.3) по параллельной схеме: через базовое сечение (R_b) и через дополнительное, постоянно растущее сечение (R_d).

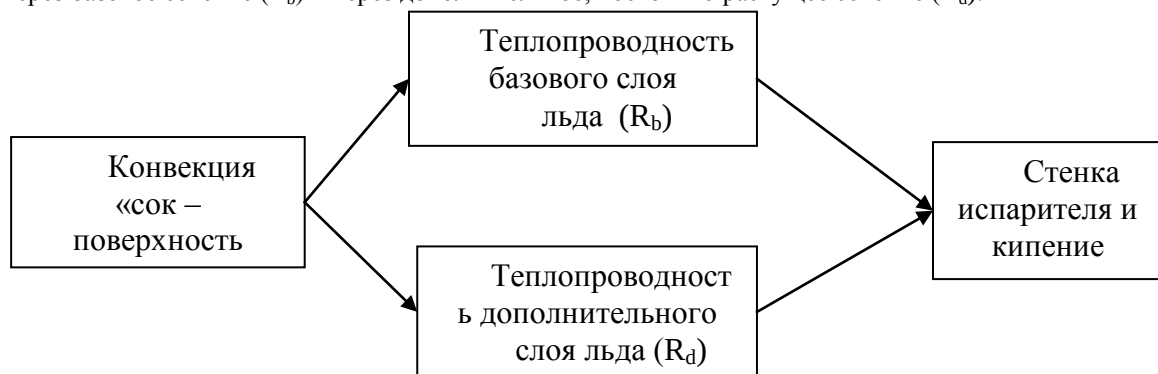


Рис.6. Схема теплопередачи.

$$R_c = R_b + R_d + R_k \quad (1)$$

На основе (рис.6) соотношение (1) можно представить в виде:

$$R_c = \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{2LB} - \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta} + \frac{1}{\alpha_k} \frac{1}{(L+\delta)2(B+\delta)} \quad (2)$$

Первое слагаемое (2.2) увеличивается с ростом толщины блока льда (δ), однако второе снижает термическое сопротивление блока, а третье – с ростом (δ) постоянно снижается (рис.7).

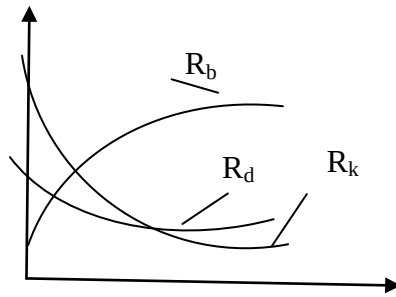
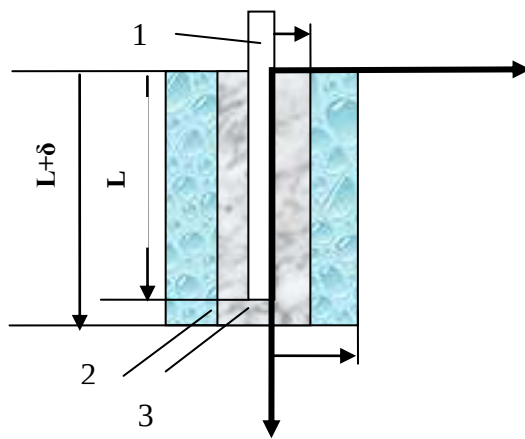


Рис.7. Зависимость R от δ .

Количественные значения составляющих термических сопротивлений определяются конкретными размерами испарителя и толщины блока льда. Предварительные оценки показывают, что суммарный эффект ожидается до 20%. Представляется, что температура кипения холодильного агента и толщина блока льда могут использоваться для «сшивания» моделей - тепломассообменной и энергетической.

Кинетические модели процесса вымораживания. Общая модель процесса, изложенная в [1], справедлива для задачи, которая поставлена на рис.8.



- 1- плоский испаритель высотой L , толщиной b и шириной $2B$.
- 2- сок;
- 3- блок льда.
- S - зона действия испарителя;
- δ - толщина блока льда.

Площадь базовой поверхности: $F_b = 2BL$

Площадь дополнительной поверхности льда:

$$F_d = 2\delta L + Lb + 2\delta(B + \delta)$$

Рис.8. Постановка задачи моделирования.

Необходимым условием процесса направленной кристаллизации является организация теплопередачи по цепи «сок – блок льда – стенка испарителя (кристаллизатора) – холодильный агент». Процесс испарения в плоских испарителях подробно изучен в работах В.П. Мордынского [3]. Конструкция такого испарителя оптимизирована, эффективная организация процесса испарения позволяет пренебречь термическим сопротивлением процесса испарения, считать, что поверхность испарителя имеет одинаковую температуру. Поэтому, на схеме (рис.8) рассматривается цепочка теплопередачи «сок – блок льда – стенка испарителя».

При записи системы уравнений будем считать, что распределение температур есть только по одной координате - X . Запишем для осесимметричной задачи в декартовых координатах уравнения энергии, неразрывности, движения с соответствующими граничными условиями и уравнениями состояния.

Для стенки кристаллизатора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{CT}}{\partial \tau} = a_{CT} \left(\frac{\partial^2 t_{CT}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3)$$

Условия однозначности включают начальные условия (4), граничные условия III рода (5) «стенка испарителя – холодильный агент», и IV рода (6 – «стенка испарителя - лед».

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{CT1} = t_{CT0} = t_x, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (4)$$

$$-\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) - \alpha_X (t_{CT} - t_0) = 0, \quad \text{при } x = x_0 \quad (5)$$

$$\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) + \lambda_{..L} \left(\frac{\partial t_{..L}}{\partial x} \right) = 0, \quad \text{при } x = x_1 \quad (6)$$

Для блока льда уравнение энергии (3), записывается при следующих условиях однозначности (8):

$$\frac{\partial t_{..L}}{\partial \tau} = a_{..L} \left(\frac{\partial^2 t_{..L}}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = x_1 \quad t_{..L} &= t_{CT1} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_{..L} &= t_{..L\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (8)$$

В пределах объема продукта нестационарное температурное поле выражается в виде:

$$\frac{\partial t_{..L}}{\partial \tau} + \frac{\partial t_{..L}}{\partial x} w_x + \frac{\partial t_{..L}}{\partial y} w_y + \frac{\partial t_{..L}}{\partial z} w_z = a_{..L} \left(\frac{\partial^2 t_{..L}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{..L}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{..L}}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

где компоненты скорости движения жидкости определяются уравнением Навье-Стокса:

$$\rho \mathbf{w} \operatorname{grad} \mathbf{w} = \rho \mathbf{g} - \operatorname{grad} P + \mu \nabla^2 \mathbf{w} \quad (10)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_{..L} &= t_{..L\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{..L} &= t_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda_{..L} \left(\frac{\partial t_{..L}}{\partial x} \right) - \alpha_{..L} (t_{..L} - t_{..L\Gamma}) = q_{KP} \quad (12)$$

Энергетический баланс процесса кристаллизации:

$$c_{P..L} \rho_{..L} \frac{d t_{..L}}{d \tau} = \lambda_{..L} \frac{d^2 t_{..L}}{d x^2} + \frac{d M_{..L}}{d \tau} \frac{1}{V} \Omega \quad (13)$$

а удельный тепловой поток, который необходим для охлаждения продукта:

$$c_{P..L} \rho_{..L} \frac{d t_{..L}}{d \tau} = q(\tau) \quad (14)$$

Соотношение (2.17) получено при допущении, что тепловой поток от диссипации энергии движения жидкости у поверхности блока льда пренебрежимо мал (а это справедливо в условиях свободной конвекции), кристаллизуется один компонент – вода, а поток массы нормируется объемом блока. Предполагаем, что массовый поток определяется только уравнением Фика:

$$\frac{d^2 M_{..L}}{d \tau^2} = \beta [C_{KP} (t_{..L\Gamma}) - C_{..L}] \frac{\rho_{..L}}{\rho_{..L}} \frac{d F_{..L\Gamma}}{d \tau} \quad (15)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, \quad C_{..L} &= C_{..L\Pi} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad C_{..L} &= C_{..L\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad C_{..L} &= C_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad \delta \leq x \leq S \end{aligned} \quad (16)$$

Одномерное нестационарное поле концентраций сухих веществ в блоке льда определяется уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \bar{C}_L}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}_L}{\partial x} w_x = D_L \left(\frac{\partial^2 \bar{C}_L}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

Наружные поверхности стенок концентратора теплоизолированы, но влияние окружающей среды необходимо учитывать. Условия на границе со стенкой концентратора со стороны продукта:

$$\text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{II} = t_S \quad (18)$$

$$-\lambda_{CTK} \left(\frac{\partial t_{CTK}}{\partial x} \right) + \alpha_{CK} (t_{CTK} - t_{II}) = 0 \quad (19)$$

Для стенки концентратора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{CTK}}{\partial \tau} = a_{CT} \left(\frac{\partial^2 t_{CTK}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad (20)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{CTK1} = t_{CTK2} = t_{OC} \quad (21)$$

Для слоя тепловой изоляции:

$$\frac{\partial t_{II}}{\partial \tau} = a_{II} \left(\frac{\partial^2 t_{II}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad (22)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{II1} = t_{II2} = t_{OC}, \quad (23)$$

Влияние окружающей среды проходит при ГУ III рода:

$$\lambda_{II} \left(\frac{\partial t_{II}}{\partial x} \right) + \alpha_C (t_{OC} - t_{II}) = 0, \quad (24)$$

Теплопередача от слоя тепловой изоляции к наружной стенке концентратора проходит при ГУ IV рода:

$$\lambda_{CTK} \left(\frac{\partial t_{CTK}}{\partial x} \right) + \lambda_{II} \left(\frac{\partial t_{II}}{\partial x} \right) = 0, \quad (25)$$

Представленную модель необходимо дополнить уравнениями связи:

$$\lambda_{CT} = \lambda(t_{CT}); \quad \lambda_L = \lambda(t_L); \quad \lambda_{II} = \lambda(t_{II}, C_{II}); \quad (26)$$

$$a_{II} = a(t_{II}, C_{II}); \quad a_{CT} = a(t_{CT}); \quad a_L = a(t_L); \quad (27)$$

$$\rho_{II} = \rho(t_{II}, C_{II}); \quad \rho_L = \rho(t_L); \quad \mu_{II} = \mu(t_{II}, C_{II}); \quad (28)$$

$$D = D(t_{II}) \quad (29)$$

Полученная модель вымораживающего устройства (3) ... (29) представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Это нестационарная, сопряженная гидродинамическая, тепловая и массообменная задача, осложненная подвижной границей раздела «лед - продукт», неопределенностью возможных внешних силовых воздействий в соотношениях. Для замыкания системы требуются соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи. Основные сложности численного моделирования связаны с решением проблем гидродинамической ситуации в объеме продукта. Наиболее рациональным решением поставленной задачи в настоящее время является применение возможностей теории подобия. На первом этапе следует конкретизировать способ и параметры воздействия на процесс кристаллизации.

Отличия начинаются в конкретизации чисел Фурье и Био. Их необходимо модернизировать в соответствие с рис. 8. Тогда, известное соотношение должно учесть, что форма слоя – пластина. Поэтому $n = 0$ [4]. С учетом приведенных уточнений определяется безразмерное время вымораживания:

$$Fo = \frac{Ph}{2} \left(1 + \frac{2}{Bi_T} \right) \quad (30)$$

где Bi_T – тепловое число Био, смысл которого заключается в соотношении внутреннего термического сопротивления и внешнего. По сути, это отношение термических сопротивлений микро- и макрокинетики.

Поскольку, форма блока льда отличается, то требуется корректировка и числа Био. Более того, следует учесть и фактор роста поверхности блока во времени, т.е. обосновать гипотезу «термического парадокса». Согласно (2) внутреннее термическое сопротивление состоит из 2 слагаемых.

$$R_{\text{л}} = \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} \left[\frac{1}{2LB} - \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta_{\text{л}}} \right] \quad (31)$$

Первое слагаемое постоянно растет из-за увеличения δ . А значение второго во времени снижает общую величину термического сопротивления блока льда.

Внешнее термическое сопротивление конвективного теплообмена «сок – поверхность блока льда» определяется коэффициентом теплоотдачи (α_k) и растущей наружной поверхностью блока льда.

$$R_{\text{к}} = \frac{1}{\alpha_k (L+\delta)2(B+\delta)} \quad (32)$$

Тогда, число Био для задачи (рис.8) запишется так:

$$Bi = \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{л}}} = \frac{\alpha_k}{\lambda_{\text{л}}} 2(L+\delta)(B+\delta) \left(\frac{\delta_{\text{л}}}{2LB} - \frac{\delta_{\text{л}}}{L\delta + 2(B+\delta)\delta_{\text{л}}} \right) \quad (33)$$

Таким образом, могут быть определены задачи и методы экспериментального моделирования процессов вымораживания.

Выводы.

1. Перспективным путем разделения пищевых растворов являются принципы криоконцентрирования. В отличие от схем объемной кристаллизации, в аппаратах блочного вымораживания обеспечивается эффект направленной кристаллизации, что способствует формированию твердой фазы с плотной упаковкой кристаллов льда.

2. Конструкции аппаратов блочного вымораживания имеют резервы для совершенствования, повышения интенсивности массопереноса при кристаллизации, роста производительности и снижения энергоемкости. Разработана математическая модель кинетики и энергетики процесса кристаллизации в аппаратах вымораживания. На основе методов теории подобия нестационарная трехмерная модель направленной кристаллизации приведена к форме, удобной для инженерных расчетов.

Литература.

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
2. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.
3. Гунько П.А. Исследование и разработка технологии извлечения белковых компонентов из творожной сыворотки низкотемпературными методами. /дис. к.т.н., 2014, Кемерово 2014 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (ФГБОУ ВПО «КемТИПП»).
4. Мальцева О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3 с.118-123 / ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
5. Овсянников В.Ю., Краминова Ю.С., Кириченко Т.С., Москаленко А.С. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ-КРИОКОНЦЕНТРАТОРАХ // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 43-44; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14704> (дата обращения: 01.01.2017).
6. Бостынец Н.И., Овсянников В.Ю. Исследования и разработка установки для криоконцентрирования вишневого сока.

ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОАДХОДЖЕННЯ ГЕЛІОПАНЕЛІ ДЛЯ ВИРОБЛЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Козін В. М., канд. техн. наук, Винниченко Б. О., студент
Сумський державний університет, м. Суми

ENHANCEMENT OF HEAT SUPPLY HELIOPANELS FOR THE PRODUCTION OF THERMAL ENERGY

V. Kozin, Cand. Tech. Sciences, Vynnychenko B.O., student
Sumy State University, Sumy

Анотація: Стаття присвячена проблемі підвищення теплонадходження геліопанелі, що працює для вироблення теплової енергії. Такі пристрої можуть використовуватися для отримання гарячої води та у системах опалення «тепла підлога». До переваг таких систем треба віднести їх повну автономність, надійність, простоту конструкції, тривалий термін служби та ін. Однак робота геліопанелі повністю залежить від кількості ефективно засвоєної нею теплової енергії сонця, яка, у свою чергу, залежить як від конструкції та властивостей матеріалів панелі, так і від кількості спрямованого сонячного випромінювання, що визначається географічним розташуванням панелі, періодом року, часом доби та геометрією взаємного розміщення площини панелі і напрямом падіння на неї сонячного променя.

Врахування динаміки кута падіння сонячного променя на геліопанель дозволяє суттєво підвищити її теплозасвоєння та збільшити тривалість сонячного опромінення, а отже, – покращити енергетичну ефективність альтернативного джерела теплової енергії, що особливо актуально при розміщенні панелі у північній та центральній частинах країни, які відносять до четвертої зони з найменшим середньорічним сонячним випромінюванням до 1000 кВт·год/м².

Abstract: Currently acute problem of energy due to the constant growth of tariffs for energy: water, electricity and heat. The situation was reinforced by the lack of sufficient amount of domestic reserves of natural gas, coal and other minerals – energy sources which used in traditional energetics. Therefore, the growing demand for energy in its various forms significantly accelerates the introduction of devices and systems that operate from alternative and renewable sources. This area is developing very actively, but as with all things new, these devices still have a relatively low efficiency.

The article deals with the problem of increase efficiency of solar battery, working to receive of heat energy. These devices can be used for hot water and heating in a "warm floor" systems. The advantages of such systems are full autonomy, reliability, simplicity of design, long life and so on. The action of solar battery depends on solar heat, which effectively completely absorbed by panel. It is depends on the design and properties panels, and on the number of directional solar radiation and it is determined by geographical location of panel, season, time of day and geometry relative placement between panel plane and the direction of fall sunlight.

Taking into account the dynamics of the angle of incidence of sunlight on solar battery to significantly increase its heat absorption and increase the time of the solar radiation, and thus – to improve the energy efficiency of an alternative source of heat. It is especially important when placing panels in the northern and central parts of the country what belongs to the fourth zone with the lowest average annual solar radiation up to 1000 kWh/m².

The use of a turning mechanism by analogy with solar panels working for the generation of electric energy, will allow in dynamic mode during the day to maintain a normal or close to its angle of incidence of sunlight. This will help to maximize the heat production efficiency of solar energy and increase the output power of the solar station. However, the use of a turning mechanism will make it impossible to install solar panels on the sloping roofs of buildings, as can be seen now. Such systems will require free horizontal areas, a strong foundation and additional pay of money, but the growth of heat energy production in the remote time will allow to return part of money by the introduction of this energy efficient measure.

Keywords: solar panel, solar energy, energy efficiency, alternative energy source, heat supply system, solar radiation, panel orientation, heat transfer.

Ключові слова: геліопанель, сонячна енергетика, енергоефективність, альтернативне джерело енергії, система теплопостачання, сонячна радіація, орієнтація панелі, теплонадходження.

Більшість геліостанцій працюють для вироблення електричної енергії, однак енергію Сонця можна використовувати і для вироблення теплової енергії. У цьому випадку променева енергія йде на нагрівання теплоносія, що циркулює у каналах панелі, а отримане тепло акумулюється у теплоізольованому баці-акумуляторі. Кількість сприйнятої панеллю теплової енергії залежить від багатьох факторів: конструкції та властивостей матеріалів панелі, кількості спрямованого сонячного випромінювання, що визначається географічним розташуванням панелі, періодом року, часом доби та геометрією взаємного розміщення площини панелі і напрямом падіння на неї сонячного променя. Якщо для сонячних панелей, що працюють для вироблення електричної енергії, вже розроблено спеціальні механізми, які дозволяють повертати її за Сонцем, то геліопанелі, що працюють для вироблення тепла, встановлюють стаціонарно з орієнтацією на південь та кутом панелі до горизонту близько 40° [1 – 5]. Такий підхід зменшує початкові капітальні витрати так скорочує термін монтажу, однак призводить до суттєвого зменшення ефективності теплосасвоєння геліопанелі через не коректний кут падіння променів на площину панелі, а також впливає на скорочення тривалості контакту сонячного проміння з панеллю. Отже, стаття присвячена актуальному питанню та дозволяє оцінити втрачений ефект від не використання поворотних механізмів у геліопанелях, що працюють для вироблення тепла на прикладі їх територіального розміщення у м. Суми.

Кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню Землі, дуже залежить від широти місцевості (див. рис. 1). Відношення середньомісячних надходжень сонячної радіації у червні і грудні зі збільшенням широти зростає, і на широті 50° пн. ш. воно приблизно дорівнює 13. Ще більше відрізняється надходження сонячної енергії у найсприятливіший і найнесприятливий дні року, при цьому відношення $E_{\max}$ і $E_{\min}$ може досягати 50. Ці дані свідчать про великі зміни протягом року кількості надходження сонячної енергії, а отже, і про подібні зміни теплопродуктивності геліосистеми [8].

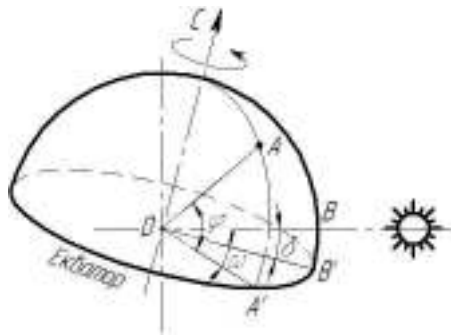


Рис. 1. Схема удаваного руху Сонця по небосхилу

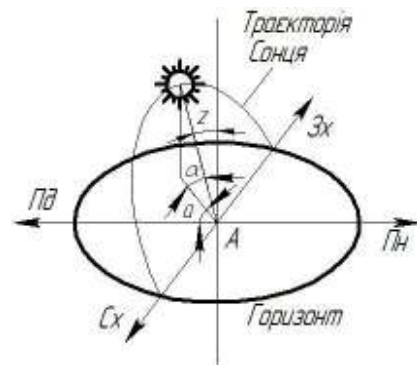


Рис. 2. Кути, які визначають положення точки A на земній поверхні відносно сонячних променів

Для розрахунку наявної кількості сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню, необхідно знати кути падіння сонячних променів на похилу і горизонтальну поверхню у даному місці. Положення деякої точки A на земній поверхні відносно сонячних променів у даний момент часу визначається трьома основними кутами: широтою місця розташування точки φ , годинним кутом ω та схиленням Сонця δ (рис. 1). Разом з трьома основними кутами φ , ω та δ у розрахунках сонячної радіації використовують також зенітний кут z , кут висоти α і азимут a Сонця (рис. 2) [7].

Схилення Сонця у довільний день року визначається за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (1)$$

де n – порядковий номер дня, відрахований від 1 січня.

Для розрахунків величину n беруть як порядковий номер середнього розрахункового дня місяця року.

Кут падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню, що має азимут a_n і кут нахилу до горизонту β , визначається за формулою:

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos a_n \cos \omega + \sin a_n \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos a_n] + \cos \beta [\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi], \quad (2)$$

де φ – широта місцевості; δ – схилення Сонця; ω – годинний кут Сонця.

Азимут вертикальної поверхні a_n в тому випадку, якщо вона орієнтована на південь, дорівнює 0° , на захід 90° , на схід -90° , на північ 180° .

Середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню сонячного колектора, визначається за формулою:

$$E_n = RE, \quad (3)$$

де E – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню, $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$; R – відношення середньомісячних денних кількостей сонячної радіації, що надходить на похилу і горизонтальну поверхні.

Коефіцієнт перерахунку кількості сонячної енергії з горизонтальної поверхні на похилу поверхню сонячного колектора з південною орієнтацією дорівнює сумі трьох складових, які відповідають прямому, розсіяному та відображеному сонячному випромінюванню:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_n + \frac{E_p}{E} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (4)$$

де E_p – середньомісячна денна кількість розсіяного сонячного випромінювання, яке надходить на горизонтальну поверхню, $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{доба})$; E_p / E – середньомісячна денна частка розсіяного сонячного випромінювання; R_n – середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню; β – кут нахилу поверхні сонячного колектора до горизонту; ρ – коефіцієнт віддзеркалення (альbedo) поверхні Землі та оточуючих тіл, який як правило беруть таким, що дорівнює 0,7 для зими та 0,2 для літа; у весняні та осінні місяці цей коефіцієнт беруть таким, що дорівнює 0,45.

Величини E_p та E беруть з довідкової літератури, наприклад, [9].

Середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню з південною орієнтацією знаходять з виразу

$$R_n = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_{z,n} + \frac{\pi}{180} \omega_{z,n} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_z + \frac{\pi}{180} \omega_z \sin \varphi \sin \delta}. \quad (5)$$

Годинний кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної поверхні

$$\omega_z = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta). \quad (6)$$

Як годинний кут заходу Сонця для похилої поверхні з південною орієнтацією беруть меншу з двох величин: ω_z або величину $\omega_{z,n}$, розраховану за формулою:

$$\omega_{s,n} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta)\operatorname{tg}\delta]. \quad (7)$$

З метою виявлення впливу повертання геліопанелі за напрямками горизонту, введемо коефіцієнт теплонадходження геліопанелі, який дозволить кількісно оцінити зростання теплонадходження панелі за рахунок її повороту на кут ω відносно півдня:

$$k_{\omega} = \frac{E_{\omega}}{E_{\omega=0}}, \quad (8)$$

де E_{ω} – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на повернену на деякий кут азимуту α панель при оптимальному куті нахилу $\beta_{\text{опт}}$ МДж/(м²·доба); $E_{\omega=0}$ – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на південно орієнтовану ($\omega = 0^\circ$) панель при оптимальному куті її нахилу $\beta_{\text{опт}}$ МДж/(м²·доба).

Використовуючи формули (1), (3) – (7), для кожного місяця року було виконано розрахунки середньомісячної фактичної добової сумарної кількості сонячної енергії залежно від кута нахилу геліопанелі β . Результати розрахунків наведені на рис. 3.

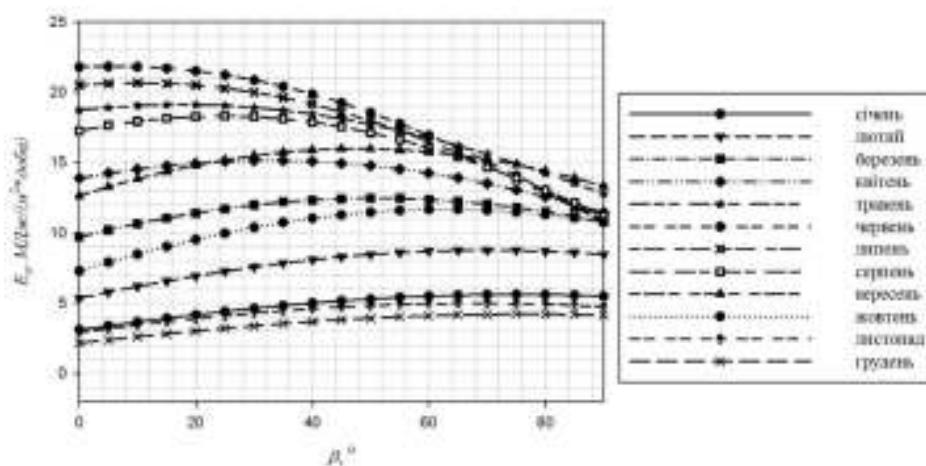


Рис. 3. Вплив кута нахилу геліопанелі до горизонту

Як бачимо з рис. 3 для кожного місяця існує власний оптимальний кут нахилу геліопанелі, який змінюється від $\beta_{\text{опт}} = 5^\circ$ для червня до $\beta_{\text{опт}} = 75^\circ$ для січня. Отже, робимо висновок, що для кожного місяця протягом року необхідно встановлювати власний кут нахилу геліопанелі, який зменшується навесні та зростає восени.

Кількісна залежність кута β та відповідний йому максимум випромінюваної сонячної енергії для $50^\circ 47'$ пн. ш, що відповідає широті розміщення м. Суми, протягом року подані на рис. 4.

З метою оцінювання відносної величини теплонадходження геліопанелі за рахунок його повертання до горизонту відносно рекомендованого значення $\beta = 40^\circ$, використовуючи формули (1), (3) – (7), було виконано порівняльні розрахунки, результати яких наведені на рис. 5.

Як видно з рис. 5, найбільше покращення теплонадходження геліопанелі за рахунок зміни його орієнтації до горизонту спостерігається у найхолодніший та найтепліший місяці року.

Ефективність теплонадходження геліопанелі залежить від кута, утвореного напрямом сонячного променя та нормалі, яка виходить з площини геліопанелі. Цей кут при розрахунках оцінюють за формулою (2). Найоптимальніший кут падіння сонячних променів буде коли ці напрями повністю співпадуть, тобто коли кут $i = 0^\circ$, що відповідає значенню $\cos i = 1$.

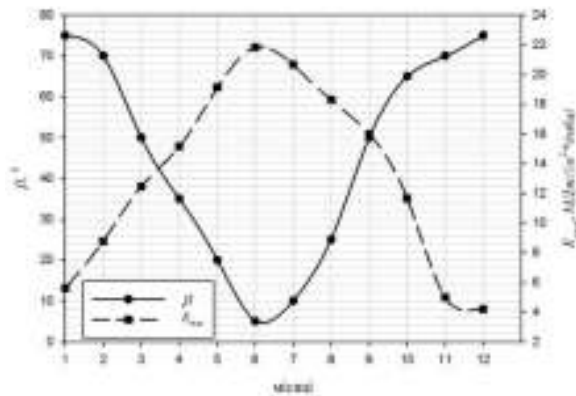


Рис. 4. Оптимальний кут нахилу геліопанелі до горизонту $\beta_{\text{опт}}$ та максимуми випромінюваної сонячної енергії E_{max} для м. Суми

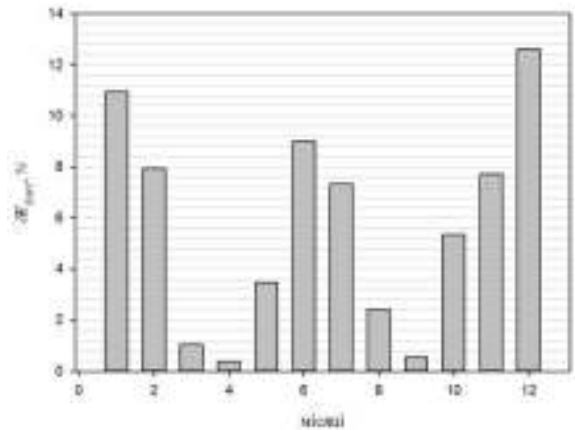


Рис. 5. Відносне зростання теплонадходження геліопанелі протягом року за рахунок його повертання до горизонту на оптимальний кут $\beta_{\text{опт}}$ порівняно з $\beta = 40^\circ$

Використовуючи зазначені вище формули був виконаний варіантний розрахунок величини $\cos i$ для кожного місяця року та часу доби, починаючи зі сходу сонця, до його заходу для отриманих вище оптимальних значень кута нахилу панелі $\beta_{\text{опт}}$. Кут повороту ω варіантно обирався із діапазону $\omega \in [-180^\circ; 180^\circ]$. Причому кут $\omega = 0^\circ$ відповідав спрямуванню панелі на південь, а кути $\omega = -90^\circ$ – на схід, $\omega = 90^\circ$ – на захід.

У результаті розрахунку, використовуючи формулу (2), було отримано максимальні значення коефіцієнта $\cos i$ протягом доби для усіх місяців року (рис. 6).

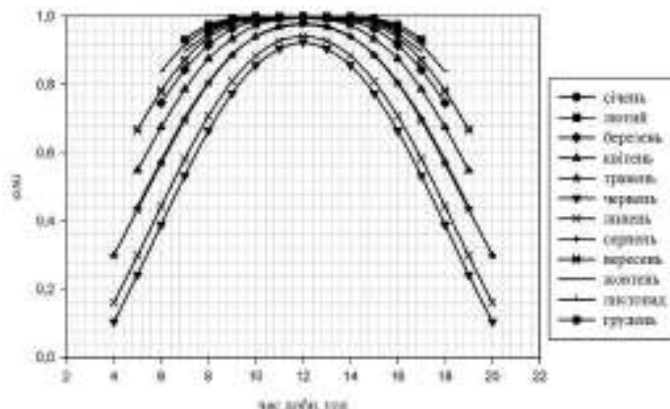


Рис. 6. Максимальні значення коефіцієнта $\cos i$ протягом доби для усіх місяців року

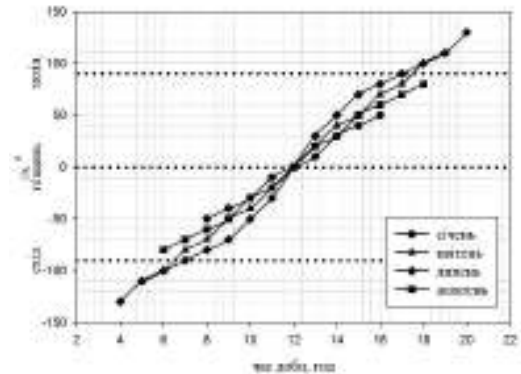


Рис. 7. Порівняльний вплив кута повороту геліопанелі відносно сторін горизонту для різних пір року

Як бачимо з рис. 6, найкраще співпадіння напрямку сонячних променів та нормалі геліопанелі спостерігається взимку. Це можна пояснити низьким схиленням Сонця та короткою тривалістю світлового дня.

На рис. 7 можемо спостерігати динаміку зміни кута повороту геліопанелі відносно сторін горизонту для різних пір року: повертання геліопанелі протягом доби симетричне відносно полудня коли для всіх пір року геліопанель спрямовується на південь. Найбільша швидкість повертання геліопанелі, тобто зміна кута ω протягом доби спостерігається у літні місяці, а найменша – взимку.

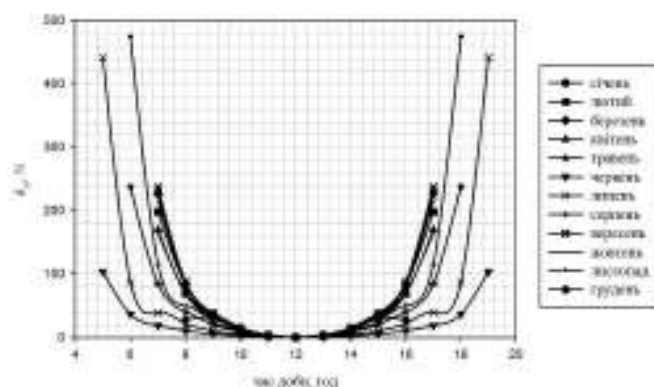


Рис. 8. Збільшення теплонадходження за рахунок повороту панелі відносно сторін горизонту протягом доби для всіх місяців року

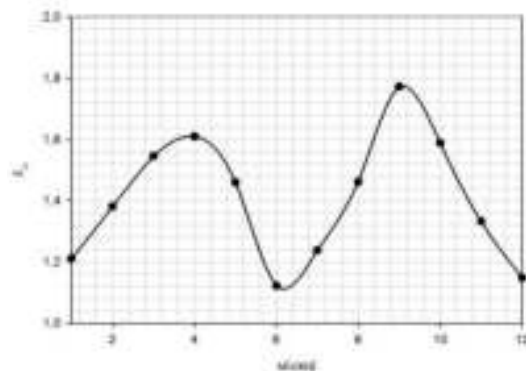


Рис. 9. Зміна середньомісячного коефіцієнта теплонадходження геліопанелі при її повороті відносно сторін горизонту за місяцями

Аналізуючи результати розрахунків коефіцієнта теплонадходження $k_{0,0}$, які показані на рис. 8 та 9, можемо зробити висновки, що найбільше зростання теплонадходження від повороту панелі відносно сторін горизонту (до 4,5 разів) спостерігається вранці та ввечері особливо у літні місяці та найбільш ефективним є використання повороту панелі відносно сторін горизонту буде навесні та восени.

Висновки

Після виконання розрахункових досліджень за поданими у роботі залежностями було отримано такі основні результати:

- 1) для кожного місяця існує власний оптимальний кут нахилу геліопанелі, який змінюється від $\beta = 5^\circ$ для червня до $\beta = 75^\circ$ для січня;
- 2) найбільше покращення теплонадходження геліопанелі за рахунок зміни її орієнтації до горизонту спостерігається у січні та липні; найменший вплив кута β спостерігається у весняні та осінні місяці;
- 3) для всіх пір року, окрім зими, максимальний поворот геліопанелі у години сходу та заходу сонця перевищує 90° , тобто панель необхідно повернути не тільки на схід при сході сонця, але ще й частково на північ;
- 4) найбільша швидкість повороту геліопанелі відносно сторін горизонту спостерігається у літні місяці, найменша – взимку;
- 5) найбільший ефект від використання повороту панелі відносно сторін горизонту спостерігається навесні та восени (до 1,78 рази), вранці і увечері – до 4,5 разів;
- 6) завдяки повороту геліопанелі відносно сторін горизонту збільшується тривалість її роботи: у березні, квітні, липні, червні, серпні, вересні на 2 години (по годині ввечері та зранку), а у травні на 4 години (по дві години під час сходу та заходу сонця).

Отже, можемо зробити загальний висновок, що з метою збільшення загального теплонадходження геліопанелі протягом року необхідно динамічно змінювати її орієнтацію шляхом зміни нахилу та повороту за сторонами горизонту. Найбільший ефект досягається при повороті за сторонами горизонту.

Література

- 1 Thermotech. Солнечное теплоснабжение: техническое пособие. [Текст] — Киев: Thermotech Vostok, 2011. — 26 с.
- 2 Vaillant. Проектирование гелиосистем. [Текст] — Киев: Vaillant, 2008. — 35 с.
- 3 Viessmann. Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения [Текст]. — Киев: Злато-Граф, 2010. — 194 с.
- 4 Junkers. Гелиотермотехника. Тетрадь проектанта. [Текст] — Киев: Юнкерс, 2007. — 204 с.
- 5 Дрексель, Р. Сооружение солнечных коллекторов для горячей воды. Практическое руководство [Текст] / Р. Дрексель, Р. Гамисония. — Киев: WECF, 2010. — 28 с.
- 6 Четошникова, Л. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учебное пособие [Текст] / Л. М. Четошникова. — Челябинск: ЮУрГУ, 2010. — 69 с.

- 7 Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки [Текст] / Н. В. Харченко. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 208 с.: ил.
- 8 Харченко, Н. В. Системы гелиотеплоснабжения и методика их расчета [Текст] / Н. В. Харченко, В. А. Никифоров. — Киев: Знание, 1987. — 240 с.
- 9 Справочник по климату СССР. В 34-х вып. / Вып. 10. Украинская ССР. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние [Текст] / Под ред. В. И. Гришко, Л. И. Мисюра. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 124 с.

УДК 621.44 + 621.577

**МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ З ОЦІНЮВАННЯ
ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-
ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ**

**Остапенко О. П., канд. техн. наук, доцент
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця**

**METHODICAL BASES OF EVALUATION OF THE ENERGY
ECONOMIC EFFICIENCY OF ENERGY SUPPLY SYSTEMS WITH
COGENERATION HEAT PUMP INSTALLATIONS AND PEAK
SOURCES OF HEAT**

**Ostapenko O. P., Cand. Tech. Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia**

***Анотація:** Запропоновано методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти (ПДТ), з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.*

Abstract: Methodical bases of evaluation of the energy economic efficiency of energy supply systems (ESS) with cogeneration heat pump installations (CHPI) of different power levels and peak sources of heat (PSH) are suggested, with taking into account the complex impact of variable operation modes of ESS, peak heat sources of heat in ESS, sources of drive energy of CHPI, and taking into consideration the energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy. The suggested methodical bases, aimed at estimation of energy economic efficiency of ESS with CHPI and PSH have a number of advantages: it takes into account the energy efficiency and power levels of the elements of ESS; it takes into consideration the operation modes of steam compressor HPI; it takes into consideration the energy efficiency of PSH and ESS and type of the energy, consumed by them, with the account of energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy to PSH and ESS; it takes into account the energy efficiency of variable operation modes of ESS with the change of load distribution between steam compressor CHPI and PSH in ESS; it enables to evaluate the complex impact of variable operation modes of ESS, peak sources of heat of ESS, sources of drive energy of steam compressor CHPI with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy in CHPI and ESS; it allows to complex perform the energy economic efficiency evaluation of great number of ESS with CHPI and PSH variants on conditions of variable operation modes; as a result of complex approach to evaluation of ESS energy economic efficiency the most efficient and economic reasonable PSH for certain type of ESS could be chosen; methodical fundamentals, suggested in the given paper, could be

used for estimation the energy economic efficiency of ESS with PSH and CHPI with various refrigerants, sources of low temperature heat and scheme solutions of HPI. The methodical fundamentals, suggested in the given paper, enable to determine areas of high energy economic efficiency of specified ESS and allow developing recommendations, aimed at high efficient operation of ESS with CHPI and PSH.

Ключові слова: методичні основи, енергоекономічна ефективність, система енергозабезпечення, когенераційно-теплонасосна установка, пікове джерело теплоти.

Key words: methodical bases, energy economic efficiency, energy supply system, cogeneration heat pump installation, peak source of heat.

Вступ. За останні роки питанням із дослідження енергетичної та економічної ефективності СЕ з КТНУ присвячено низку публікацій [1 – 8], виконано низку досліджень з розробки методів оцінки енергетичної та енергоекономічної ефективності застосування комбінованих КТНУ в теплових схемах джерел енергопостачання. В публікаціях [6 – 8] проведено ряд досліджень з оцінки енергетичної та економічної ефективності систем енергозабезпечення на основі парокомпресійних теплонасосних установок (ТНУ), а також когенераційно-теплонасосних установок. В публікаціях [6 – 8] підтверджена висока енергетична ефективність систем енергозабезпечення з КТНУ. В роботах [1 – 8] авторами не запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Метою дослідження є розроблення методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Основна частина. В нашому дослідженні запропоновано методичні основи для комплексного оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками (з приводом від газопоршневого двигуна (ГПД)) різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електродкотлом, сонячними колекторами тощо). Схеми досліджуваних СЕ наведені в роботі [1]. Застосування зазначених СЕ має ряд енергетичних переваг, що визначено у публікації [6]. Когенераційний привод компресорів ТНУ може бути забезпечений на основі газових двигунів-генераторів, що випускаються українськими підприємствами: «Первомайськдизельмаш» та ДП «Завод ім. В. О. Малишева». В дослідженні [6] запропоновано методичні основи з оцінювання енергетичної ефективності СЕ з КТНУ та піковими джерелами теплоти.

В роботі [7] обґрунтовано показники з оцінки енергоекономічної ефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ з метою визначення енергоефективних та економічно обґрунтованих режимів роботи СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Як зазначено у роботах [6 – 7], енергетична ефективність СЕ в значній мірі залежить від оптимального розподілу навантаження між елементами СЕ: когенераційно-теплонасосною установкою та піковим джерелом теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електродкотлом, сонячними колекторами тощо) у складі СЕ та рівнів енергоефективності цих елементів. Оптимальний розподіл навантаження між елементами СЕ характеризується часткою навантаження КТНУ у складі СЕ β [6 – 7], яка дорівнює співвідношенню теплових потужностей КТНУ (з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу КТНУ) та СЕ.

В наших дослідженнях [6 – 7] проаналізована енергетична ефективність системи «Джерело приводної енергії СЕ – СЕ – споживач теплоти від СЕ» на прикладі СЕ на основі парокомпресійних ТНУ з когенераційним приводом та пікових джерел теплоти, з врахування втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ та ПДТ з метою визначення енергоефективних режимів роботи СЕ. В роботах [6 – 7] запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності СЕ $K_{\text{СЕ}}$, який враховує безрозмірні критерії енергоефективності КТНУ $K_{\text{КТНУ}}$ та ПДТ

$K_{ПДТ}$ та розподіл теплового навантаження між цими елементами СЕ. Безрозмірний критерій енергоефективності парокомпресійних КТНУ $K_{КТНУ}$, запропонований в дослідженнях [6, 8], був одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії КТНУ – КТНУ – споживач теплоти від КТНУ» з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до КТНУ.

Безрозмірний критерій енергоефективності ПДТ – електрокотла – у складі СЕ $K_{ПДТ}$, запропонований в дослідженні [6], був одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії – електричний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового електрокотла та з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні електричної енергії до електрокотла. Безрозмірний критерій енергоефективності ПДТ – водогрійного паливного котла – у складі СЕ $K_{ПДТ}$, запропонований в дослідженні [6], був визначений на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерела електричної енергії та палива – паливний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового паливного котла та з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні електричної енергії до котла. Для випадків використання альтернативних пікових джерел теплоти в СЕ (наприклад, сонячних колекторів для СЕ невеликої потужності) значення безрозмірного критерію енергоефективності ПДТ в СЕ $K_{ПДТ}$ дорівнюватиме ККД альтернативного пікового джерела теплоти $\eta_{АПДТ}$, або ККД додаткової системи з альтернативним піковим джерелом теплоти $\eta_{АПДТ}^c$, що зазначено в дослідженні [6].

Комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ $K_{СЕ}$ з досліджень [6 –7] запропонований також для вибору найбільш ефективного ПДТ для певного виду СЕ. В роботі [6] зазначено, що комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ $K_{СЕ}$ може бути використаний для вибору найбільш ефективного пікового джерела теплоти для певного виду СЕ та енергоефективних режимів роботи СЕ за умови $K_{СЕ} > 1$.

В дослідженні [7] запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергоекономічної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ за комплексним узагальненим безрозмірним критерієм енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ:

$$K_{СЕ}^{ен.ек.} = K_{СЕ} + \Delta E_i^{СЕ} = (1-\beta) \cdot K_{ПДТ} + \beta \cdot K_{КТНУ} + \Delta E_i^{СЕ}, \quad (1)$$

де $\Delta E_i^{СЕ}$ – відносна економічна ефективність (у частках) для СЕ на основі КТНУ та ПДТ для i -го режиму роботи СЕ, яка визначається наступним чином:

$$\Delta E_i^{СЕ} = \frac{(E_{ДТ})_i - (E_{СЕ})_i}{(E_{ДТ})_i}, \quad (2)$$

де $(E_{ДТ})_i$ – експлуатаційні витрати для i -го режиму роботи заміщуваного джерела теплової енергії (ДТ), $(E_{СЕ})_i$ – експлуатаційні витрати для i -го режиму роботи СЕ.

Як зазначено в [7] економічно ефективні режими роботи СЕ будуть забезпечуватись за умови $\Delta E_i^{СЕ} > 0$. Енергоефективні та економічно обґрунтовані режими роботи СЕ з комбінованими КТНУ та ПДТ будуть забезпечуватись за умови $K_{СЕ}^{ен.ек.} > 1$. Чим більшим буде значення показника $K_{СЕ}^{ен.ек.}$, тим більш енергоефективними, економічно ефективними та конкурентоздатними будуть СЕ з КТНУ та ПДТ.

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ мають низку переваг:

- враховують енергоефективність та рівні потужності елементів СЕ;
- враховують режими роботи парокомпресійних ТНУ;
- враховують енергоефективність ПДТ в СЕ та вид споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до ПДТ та СЕ;
- враховують енергоефективність змінних режимів роботи СЕ зі зміною розподілу навантаження між парокомпресійними КТНУ та ПДТ в СЕ;

дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ та СЕ;

дозволяють комплексно оцінювати енергоекономічну ефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ за умов змінних режимів роботи;

можуть бути використані для вибору найбільш енергоефективного та економічно обгрунтованого ПДТ для певного виду СЕ;

запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з ПДТ та КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями ТНУ.

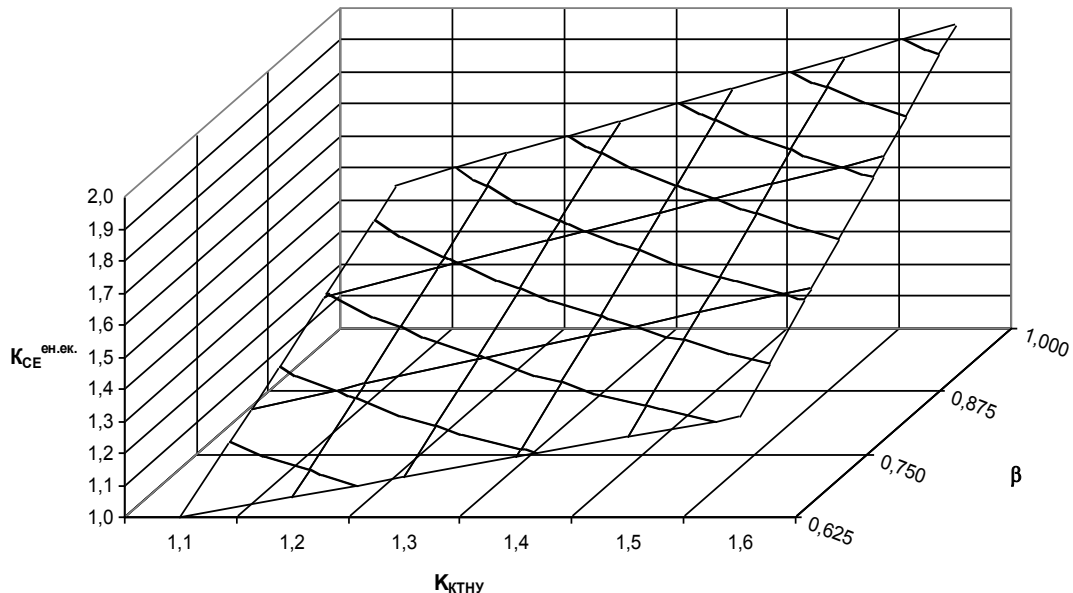


Рис. 1. Область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти ґрунту, з КТНУ малої потужності та піковим електричним котлом, за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електричного котла та споживання електричної енергії від КТНУ

Застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ продемонструємо на конкретних прикладах. На рис. 1 та 2 показані для прикладу результати оцінки енергоекономічної ефективності варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ. В цьому дослідженні значення безрозмірного критерію енергоекономічної ефективності СЕ визначені за умов зміни частки навантаження КТНУ в діапазоні $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Дослідження проведено для режимів енергоефективної роботи КТНУ з $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ (за умов максимальної ефективності ГПД) та з $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$ (за умов мінімальної ефективності ГПД) на основі результатів досліджень [6, 8].

На рис. 1 показана область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти ґрунту, з КТНУ малої потужності та піковим електричним котлом, зі споживанням електричної енергії від КТНУ. Ця область визначена за показником енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ з [7], за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електричного котла. В дослідженні, згідно з [6, 8], враховані: значення ефективного ККД ГПД $\eta_{ЕД} = 0,31$, значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в

з $\eta_{ЕК} = 0,9$. Значення безрозмірного критерію енергоефективності електричного котла у разі споживання електроенергії від КТНУ, згідно з [6], становить $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0,223$.

блоці управління двигуном $\eta_{ЕП} = 0,8$. Піковим джерелом теплоти в СЕ передбачена електрична котельня

На рис. 2 показана область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти стічних вод, з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом, визначена за показником енергоекономічної

ефективності СЕ з КТНУ з [7], за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла. В дослідженні, згідно з [6, 8], враховані: значення ефективного ККД ГПД $\eta_{\text{ЕД}} = 0,42$ та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном $\eta_{\text{ЕП}} = 0,9$. Піковим джерелом теплоти в СЕ передбачена паливна котельня з $\eta_{\text{ПК}} = 0,9$. Значення безрозмірного критерію енергоефективності паливного котла, згідно з [6], становить $K_{\text{ПДТ}}^{\text{ПК}} = 0,9$.

Запропоновані методичні основи дозволяють визначити області високої енергоекономічної ефективності зазначених СЕ та розробити рекомендації з високоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ.

Для практичного застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ ми пропонуємо використовувати результати з досліджень [6 – 8].

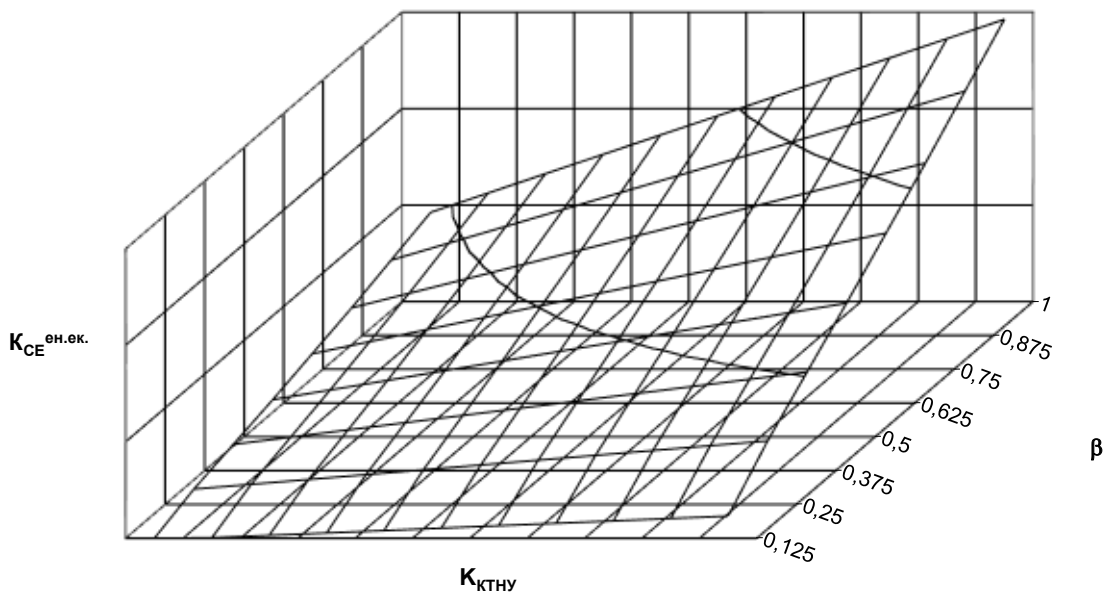


Рис. 2. Область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти стічних вод, з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом, за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

Висновки. В статті запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ мають низку переваг:

- враховують енергоефективність та рівні потужності елементів СЕ;
- враховують режими роботи парокомпресійних ТНУ;
- враховують енергоефективність ПДТ в СЕ та вид споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до ПДТ та СЕ;
- враховують енергоефективність змінних режимів роботи СЕ зі зміною розподілу навантаження між парокомпресійними КТНУ та ПДТ в СЕ;

- дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ та СЕ;
- дозволяють комплексно оцінювати енергоекономічну ефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ за умов змінних режимів роботи;
- можуть бути використані для вибору найбільш енергоефективного та економічно обгрунтованого ПДТ для певного виду СЕ;
- запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з ПДТ та КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями ТНУ.

Запропоновані в статті методичні основи дозволяють визначити області високої енергоекономічної ефективності зазначених СЕ та розробити рекомендації з високоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ.

Для практичного застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ ми пропонуємо використовувати результати з досліджень [6 – 8].

Література

1. Ткаченко, С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія [Текст] / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Leeuwen, Richard P. Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps [Електронний ресурс] / Richard P. Leeuwen, J. Fink, Jan B. Wit, Gerard J.M. Smit // *Energy, sustainability and society*. 2015. – N. 5 (16). Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0044-x>.
3. Mueller, S. Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems [Text] / S. Mueller, R. Tuth, D. Fischer, B. Wille-Haussmann, C. Wittwer // *Energy technology*. 2014. – N. 2 (1). – P. 83 – 89.
4. Билека, Б. Д. Когенерационно-теплонасосные технологии в схемах горячего водоснабжения большой мощности [Текст] / Б. Д. Билека, Л. К. Гаркуша // *Промышленная теплотехника*. 2012. – Т. 34, №4. – С. 52 – 57.
5. Сафьянц, С. М. Исследование схемы источника теплоэлектрооснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов [Текст] / С. М. Сафьянц, Н. В. Колесниченко, Т. Е. Веретенникова // *Промышленная теплотехника*. 2011. – Т. 33, № 3. – С. 79 – 85.
6. Остапенко, О. П. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок і пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. 2016. – № 1. Режим доступу: URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
7. Остапенко, О. П. Показники енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. М. Портнов, А. Д. Волошин // *Електронне наукове видання матеріалів XLVI науково-технічної конференції Вінницького національного технічного університету (22 – 24 березня 2017 р., Вінниця)*. Режим доступу: URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.
8. Остапенко, О. П. Енергетична ефективність парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2014. – № 4. Режим доступу: URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419>.

УДК 66.047

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ

Снежкин Ю.Ф., д-р техн. наук, профессор, Коринчук Д.Н. канд. техн. наук, ст. научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

MODELING OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF PEAT AND BIOMASS IN BIOFUEL PRODUCTION TECHNOLOGIES

Sneszkin Yu.F., Korinchuk D. N

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Аннотация: Статья посвящена разработке математической модели процесса высокотемпературной сушки торфа и растительной биомассы в технологиях производства твердых биотоплив. Предложенная математическая модель учитывает наиболее характерные стороны процесса высокотемпературной сушки частиц.

По аналогии с процессами, связанными с движением границ фазового раздела, предполагается, что испарение жидкости осуществляется главным образом в узкой зоне, распространяющейся по мере сушки в глубь материала и разделяющей области, занятые паром и жидкостью. Ширина зоны испарения определяется размером клеток или пор сырья, что значительно меньше характерного размера высушиваемого тела и позволяет заменить зону испарения фронтом испарения пренебрежимо малой толщины. В сухой области перемещается только пар, во влажной влагосодержание остается неизменным и равно начальному. Градиент температуры во влажной области отсутствует, т.е. частица прогрета равномерно до температуры фазового перехода. По мере высыхания в сухой области формируется распределение температур, описываемое законами теплопроводности. Скорость продвижения границы сухой зоны определяется из уравнения баланса тепла и влаги на границе фронта испарения. Изменение влагосодержания частицы определяется пропорционально отношению координаты продвижения фронта испарения к радиусу частицы. Для частиц торфа модельным телом принята сфера, для растительной биомассы модельным телом принято цилиндр.

Получены аналитическим путем уравнения позволяют определить время высыхания частиц до заданной влажности. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса сушки частиц торфа и древесины при температурах 120 °C и 140 °C. Подтверждена адекватность математической модели. Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений не превысило 3%, что позволяет сделать вывод о достаточной точности описания процесса сушки данной моделью и возможности ее применения для разработки инженерных методик расчета и оптимизации режимов работы сушильного оборудования технологий производства твердых биотоплив.

Absstract: The article is dedicated to the development of a mathematical model for the process of high-temperature drying of peat and biomass in technologies for the solid biofuels production. The proposed mathematical model takes into account the most specific aspects of high-temperature drying of particles.

By analogy with the processes associated with the moving the boundaries of the phase separation, it is assumed that the evaporation of the liquid is carried out mainly in a narrow zone, which spreads while drying into the depth of the material and which is separating the areas occupied by the vapor and liquid. The width of the evaporation zone is determined by the size of the cells or pores of the raw material, which is much smaller than the characteristic size of the body being dried, that allows substituting the evaporation zone with a vaporization front of negligible thickness. In a dry part only steam moves, in a moist part the moisture content remains unchanged and equal to the initial value. The temperature gradient in a moist part is absent, i.e. a particle is heated evenly up to the temperature of the phase transition. As the drying proceeds in a dry part a temperature ranging is being formed, which is described by the laws of thermal conductivity. The rate of moving the dry zone boundary is determined from the equation of heat and moisture balance at the boundary of the evaporation front. The change in the moisture content of a particle is determined in proportion to the ratio of the coordinate of advancing the evaporation front to the radius of a particle. For particles of peat a sphere is adopted as a model body, a cylinder is adopted as a model body for plant biomass.

The equations obtained by the analytical method allow determining the time of drying particles to a specific humidity. The results of the experimental studies of the process of drying of peat and wood particles are presented. The adequacy of the mathematical model is confirmed. The average statistical deviation for the experimental and calculated values did not exceed 3%, that allows concluding about the sufficient accuracy for the description of the drying process given with applying proposed model and the possibility of its application for the development of engineering techniques for calculating and optimizing the operation modes of drying equipment for solid biofuel production technologies.

Ключевые слова: биотопливо, биомасса, торф, сушка, математическая модель, квазистационарный режим.

Key words: Bio-fuel, biomass, peat, drying, mathematical model, quasi-stationary mode.

Постановка проблемы. В современных условиях, когда наблюдается возрастание дефицита и рост цен на традиционные энергоносители, особая роль в обеспечении энергетической независимости страны отводится альтернативной энергетике. Альтернативой природному газу в Украине выступает растительная и древесная биомасса, а также торф. В природном, неподготовленном состоянии это относительно сложные объекты для энергетического использования. Технологии переработки биомассы, включающие дробление, сушку и гранулирование позволяют нормализовать по влажности, гранулометрическому составу биотопливо, увеличить его объёмную теплоту сгорания, что повышает эффективность использования топлива в котельном оборудовании, снижает транспортные и складские затраты.

Наиболее энергоёмким в технологиях переработки биомассы и торфа в биотопливо является процесс обезвоживания [1]. Разработка и применение в производстве новых эффективных способов сушки биомассы, создание высокопроизводительного сушильного оборудования, совершенствование работы существующих сушилок способствует рациональному использованию природных ресурсов, снижению себестоимости биотоплива и повышению конкурентоспособности производства.

В настоящее время в технологиях производства твердого биотоплива в Украине эксплуатируется несколько типов сушилок, использующих в качестве теплоносителя высокотемпературные топочные газы. Из них наиболее перспективны аэродинамические сушилки, которые более просты в изготовлении и не требуют сложного энергетического оборудования. Основным и общим недостатком существующих конструкций аэродинамических сушилок является сравнительно невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов, что увеличивает их габариты и расход тепла на сушку. Основные требования, предъявляемые к высушенному продукту, состоят в том, что влагосодержание смеси перед прессованием не должно превышать 0,2 кг/кг, а влагразность отдельных фракций - 0,15 кг/кг с. в. Как показывает практика [1], большинство сушилок являются достаточно энергоёмкими, и тем не менее, не обеспечивают нужного качества сушенки. Все это снижает эффективность работы технологических линий, оснащенных аэродинамическими сушилками и сдерживает их широкое внедрение.

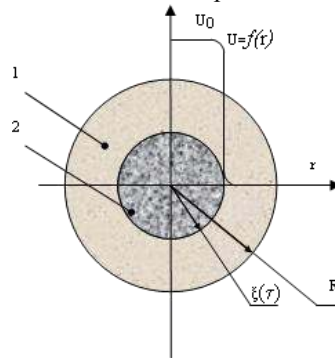
Исследования в области моделирования процессов высокотемпературной сушки биомассы и торфа, позволяют разработать и обосновать методы интенсификации процесса сушки, разработать инженерные методики расчета оборудования и обеспечить создание наиболее рациональных конструкций сушильных установок.

Цель работы. Целью данной работы является разработка модели, описывающей тепломассообмен влажной частицы с высокотемпературным газом и определение ее корректности на основе экспериментальных исследований.

Анализ предыдущих исследований. В общем случае исследование сушки пористого тела связано с решением весьма сложной задачи движения двухфазной газожидкостной смеси при наличии фазового перехода и одновременного переноса тепла в трехфазной системе. Эта задача существенно нелинейна в связи с зависимостью коэффициентов в уравнениях движения и конвективной теплопроводности (например, проницаемости пористого тела для обеих движущихся фаз, эффективного коэффициента теплопроводности и т.п.) от температуры, влагосодержания и других неизвестных величин. Задача еще более усложняется необходимостью учета кинетики фазового превращения и межфазового теплообмена, капиллярных явлений, вызывающих перетекание жидкости из крупных пор в мелкие, а также явлений десорбции или перехода химически связанной жидкости в свободное состояние. Строгая теория сушки отсутствует, и имеются лишь попытки дать полупеномологическое описание этого процесса. Упрощенные модели сушки такого типа предложены в работах [2-4]. Однако эти модели также содержат большое число неизвестных величин, входящих в нелинейные дифференциальные уравнения, решения которых могут быть получены лишь в частных случаях и имеют весьма громоздкий вид, затрудняющий

их практическое использование. Вместе с тем в ряде случаев такие факторы, как, например, адсорбционно-связанная влага, перемещение жидкости в порах и другие, несущественны, так что могут быть предложены вполне обозримые модели таких процессов, позволяющие получить корректные результаты, достаточные для практических целей. По аналогии с процессами, связанными с движением границ фазового раздела, можно предположить, что испарение жидкости осуществляется главным образом в узкой зоне, распространяющейся по мере сушки в глубь материала и разделяющей области, занятые паром и жидкостью. В случае предварительного измельчения частиц растительной биомассы путем ударно-сдвиговых деформаций в молотковых или других дробилках происходит разрушение пор и клеток на микро и макроуровне, что обеспечивает свободный выход парообразной фазы из пор частицы. Ширина зоны испарения определяется характерным размером клеток, капиллярными силами, вызывающими перераспределение жидкости в порах разных размеров, а также соотношением между теплом, затрачиваемым на нагрев тела и жидкости во «влажной» области, и теплом, идущим на испарение. При сушке биомассы и торфа ширина зоны испарения оказывается значительно меньше характерного размера высушиваемого тела, так что эту зону можно заменить фронтом испарения пренебрежимо малой толщины. Анализ формы частиц после измельчения показал, что для торфа модельное тело имеет сферическую форму, для растительной и древесной биомассы цилиндрическую форму [5].

Основной материал. Рассмотрим сушку сферической частицы или цилиндрической (в случае биомассы) радиуса R , в которой сформировался фронт испарения $\xi = f(\tau)$ (рис. 1). Предположим, что при углублении фронта испарения материал делится на две области “сухую” и “влажную”. В сухой области перемещается только пар, во влажной влагосодержание остается неизменным и равно начальному. Градиент температуры во влажной области отсутствует, т.е. частица прогрета равномерно до температуры фазового перехода. По мере высыхания в сухой области $\xi(\tau) \leq r \leq R$ формируется распределение температур описываемое законами теплопроводности.



1-сухая область; 2-влажная область

Рис.1. Распространение фронта испарения в сферической или цилиндрической частице

Изменение температуры в сухой зоне $\xi(\tau) < r < R$ для сферических в частиц, в случае сушки торфа, описывается уравнением теплопроводности для сферического тела:

$$a \cdot \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT}{dr} \right) = \frac{dT}{d\tau}. \quad (1)$$

Для случая сушки растительной биомассы изменение температуры описывается уравнением теплопроводности для цилиндрического тела:

$$a \cdot \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) = \frac{dT}{d\tau}. \quad (2)$$

С граничными условиями 3 рода на поверхности частицы:

$$\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = \alpha (T_{cp} - T(R)). \quad (3)$$

И первого рода на границе фронта испарения:

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=\xi(\tau)} = 0. \quad (4)$$

Скорость продвижения границы сухой зоны определяется из уравнения баланса тепла и влаги на границе фронта испарения или еще называют условием Стефана на фронте фазового перехода:

$$\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=\xi(\tau)} = L \cdot U_0 \cdot \rho_{\text{сyx}} \frac{d\xi(\tau)}{d\tau}, \quad (5)$$

где λ – эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий явления термодиффузии, конвективные токи в порах, теплоперенос парами воды, U_0 – начальное влагосодержание сырья, R – радиус частиц сырья, L – скрытая теплота парообразования.

Аналитическое решение модели найти достаточно сложно, поэтому приходится применять приближенные методы. Один из наиболее распространенных в инженерной практике методов, позволяющий получить решения предложен в 1931г. Л.С.Лейбензоном. Идея этого метода заключается в замене реального распределения температуры распределением, удовлетворяющим уравнению Лапласа (по этой причине данный метод иногда называют квазистационарным), а после нахождения температурного поля скорость движения фронта определяется с помощью условия Стефана.

Рассмотрим возможность решения математической модели высокотемпературной сушки частиц сферической формы. Пренебрегая периодом прогрева предполагаем, что в некоторый момент времени на поверхности сферической частицы устанавливается температура $T(R) > T\phi$. Фронт испарения начинает двигаться от поверхности к центру частицы. Пропорционально продвижению фронта будет изменяться средняя влажность частицы. Закон изменения влажности частицы можно найти из следующего равенства:

$$U(\tau) = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{сyx}}} = \frac{\rho_{\text{сyx}} U_0 \frac{4}{3} \pi \xi^3}{\rho_{\text{сyx}} \frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{U_0 \xi^3}{R^3}, \quad (6)$$

где $m_{\text{вл}}$, $m_{\text{сyx}}$ – масса влаги и сухого материала частицы, $\rho_{\text{сyx}}$ – плотность сухого материала частицы.

Температуру влажной части считаем всюду постоянной и равной $T\phi$, соответственно градиент температуры, а вместе с ним и тепловой поток во влажной зоне равны нулю. Будем решать задачу квазистационарным методом Лейбензона. Положим в уравнении $\partial T / \partial \tau = 0$, тогда распределение температуры в области $\xi(\tau) < r < R$ будет равно:

$$T(r) = C_2 - \frac{C_1}{r}, \quad (7)$$

Константы интегрирования C_1 и C_2 определяются из граничных условий:

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{ср}} - T(R)) = \frac{C_1}{R^2}, \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} T(R) &= C_2 - \frac{C_1}{R^2} \\ T(\xi(\tau)) &= T\phi = C_2 - \frac{C_1}{\xi(\tau)} \end{aligned} \right\} = T(R) = T\phi + \frac{C_1}{\xi(\tau)} - \frac{C_1}{R}. \quad (9)$$

Решая совместно выражения (8) и (9) получаем выражение (10) для константы C_1 .

$$C_1 = \frac{T_{\text{ср}} - T\phi}{\frac{1}{R} - \frac{1}{\text{Bi} \cdot R} - \frac{1}{\xi(\tau)}}. \quad (10)$$

Подставляя в условие Стефана выражение (10) получаем дифференциальное уравнение распределение температуры в сухой области относительно координаты фронта испарения $\xi(\tau)$.

Таким образом, стационарное распределение температуры сухой области имеет вид:

$$\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=\xi(\tau)} = \frac{C_1}{\xi(\tau)^2} = \frac{1}{\xi(\tau)^2} \frac{T_{\text{ср}} - T\phi}{\frac{1}{R} - \frac{1}{\text{Bi} \cdot R} - \frac{1}{\xi(\tau)}} = L \cdot U_0 \cdot \rho \frac{d\xi(\tau)}{d\tau}. \quad (11)$$

Разделяем переменные и проводим интегрирование правой части в пределах координат перемещения фронта испарения от R до ξ , а левой части в пределах от начала времени сушки до ее окончания.

$$\int_0^{\tau} \frac{(T_{cp} - T\phi)\lambda \cdot d\tau}{L \cdot U_0 \cdot \rho} = \int_R^{\xi} \xi(\tau)^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{Bi \cdot R} - \frac{1}{\xi(\tau)} \right) d\xi(\tau). \quad (12)$$

После интегрирования получено уравнение описывающее зависимость изменения координаты перемещения фронта испарения во времени:

$$\frac{(T_{cp} - T\phi)\lambda \cdot \tau}{L \cdot U_0 \cdot \rho} = \left(\frac{\varepsilon^3}{3R} - \frac{\varepsilon^3}{3Bi \cdot R} - \frac{\varepsilon^2}{2} \right) - \left(\frac{R^3}{3R} - \frac{R^3}{3Bi \cdot R} - \frac{R^2}{2} \right). \quad (13)$$

В процессе обезвоживания доля влаги будет убывать по мере перемещения фронта испарения к центру частицы. Изменение влагосодержания частиц U может быть определено из зависимости (6)

Выразим координату ξ через изменение влагосодержания частицы в процессе сушки:

$$\xi = R \cdot \sqrt[3]{\frac{U}{U_0}} \quad (14)$$

Подставим выражение (14) в уравнение (13) и получим зависимость времени сушки от изменения влагосодержания сферической частицы:

$$\tau = \frac{L \cdot U_0 \cdot \rho \cdot R^2}{(T_{cp} - T\phi)\lambda} \left(\frac{U}{3U_0} - \frac{1}{3Bi} \frac{U}{U_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3Bi} \right). \quad (15)$$

Аналогично можно получить расчетное уравнение для случая сушки цилиндрической частицы:

$$\tau = \frac{L \cdot U_0 \cdot \rho \cdot R^2}{(T_{cp} - T\phi)\lambda} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2Bi} - \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2Bi} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_0}{U} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{4} \right) \right). \quad (16)$$

Наиболее адекватно данные уравнения описывают условия сушки, когда средняя скорость движения фронта испарения не превышает скорость установления стационарного распределения температуры в сухой зоне. Если R – определяющий размер, то R^2/a – характерное время установления температуры в сухой области. Соответственно, условие применимости данной модели имеет вид:

$$a_1 \geq \frac{R^2}{\tau} \quad \text{или} \quad (T_{cp} - T\phi) \leq \frac{L \cdot U_0}{c} \cdot A, \quad (17)$$

где для сушки сферических частиц торфа $A = \frac{U}{3U_0} - \frac{1}{3Bi} \frac{U}{U_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3Bi}$,

для сушки цилиндрических частиц биомассы $A = \frac{1}{4} + \frac{1}{2Bi} - \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2Bi} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_0}{U} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{4} \right)$, c –

теплоемкость сухой области частицы, Дж/кг·К.

При температурах сушильного агента от 100 °С до 400 °С для большинства видов биомассы и торфа при размере частиц до 6 мм параметр A находится в диапазоне 0,5-0,1, соответственно величины

температуропроводности и отношения $\frac{R^2}{\tau}$ будут одного порядка, что является достаточным условием

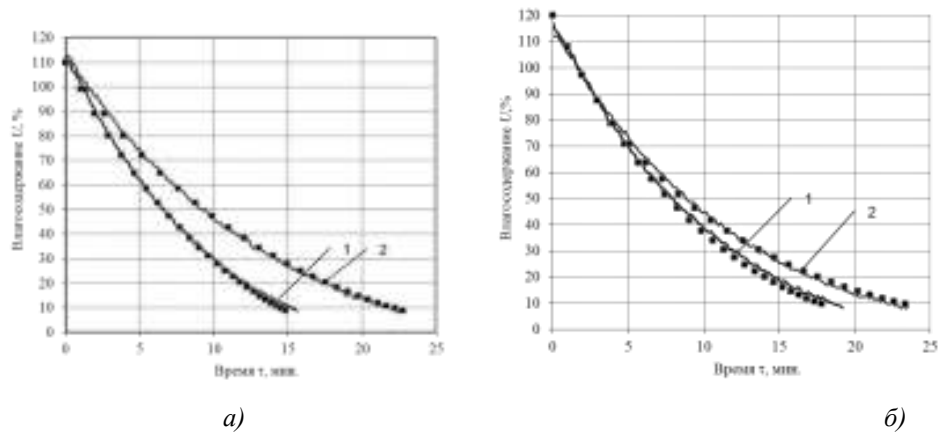
применения данной методики для инженерных расчетов высокотемпературных процессов сушки биомассы и торфа в технологиях переработки биомассы на топливо.

Предложенная математическая модель учитывает наиболее характерные стороны процесса высокотемпературной сушки частиц. Ряд допущений и неучтенные факторы, такие как отсутствие стадии прогрева, отклонения формы частиц от сферической или цилиндрической, отсутствие усадки расплывания фронта испарения, неустановившийся стационарный режим распределения температур в сухой области и т. д., в реальных условиях вносят в результаты теоретических расчетов определенную погрешность.

Для проверки адекватности математической модели были проведены лабораторные исследования процесса сушки частиц торфа и древесины размером 4,5-5 мм с исходным влагосодержанием 1,1-1,2 кг/кг с.в. на специализированном стенде исследования процессов тепломассобмена при сушке растительных материалов Института технической теплофизики НАН Украины. Частицы заданного размера вводились в сушильную камеру. Температура сушильного агента составила 120 °С и 140 °С. Скорость сушильного агента в камере 3 м/с. Снималась кинетика обезвоживания монослоя частиц сырья $U = f(\tau)$. Результаты расчета процесса обезвоживания (показано маркером) и экспериментальные данные (сплошная линия) приведены на (рис. 2). Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений составило не более 3%. При расчете времени обезвоживания использовались

методики расчета теплообмена предложенные в [3] Достаточно высокая сходимость результатов наблюдалась при использовании в расчетах для торфа эффективного коэффициента теплопроводности в пределах 0,1-0,11 Вт/м·К, для древесины 0,12-0,2. Вт/м·К. При расчетах следует уделять внимание коэффициенту формы частиц, влияние которого на величину коэффициента теплоотдачи в данной работе не исследовали.

Как видно из экспериментальных данных, участок прогрева не превышает 1% времени сушки. Заниженные по сравнению с табличными коэффициенты теплопроводности [6,7] для биомассы и торфа свидетельствуют о наявности внутренних фильтрационных явлений сопровождающихся термодифузией, а так же влиянием на процесс осмотических и адсорбционных сил, замедляющих процесс сушки.



1-при температуре сушильного агента 140 °С, 2- при температуре сушильного агента 120 °С.
Сплошная линия- результаты эксперимента, маркер- результаты расчета.

Рис.2. Изменение влагосодержания при сушке частиц торфа(а) и частиц энергетической ивы (б)

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о справедливости основных допущений положенных в основу предлагаемой математической модели.

Выводы. В результате проведенных исследований разработана модель сушки частиц биомассы и торфа высокотемпературным теплоносителем. Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений не более 3%, что позволяет сделать вывод о достаточной точности описания процесса сушки данной моделью и возможности ее применения для разработки инженерных методик расчета и оптимизации режимов работы сушильного оборудования технологий производства твердых биотоплив.

Література

1. Коринчук, Д. Н. Выбор сушильной установки мобильного комплекса производства топливных брикетов и гранул из биомассы [Текст] / Д. Н. Коринчук // Вісник НТУУ «КПІ» «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2(8). – С. 37 – 42.
2. Снежкин, Ю. Ф. Модель высокотемпературной сушки сферических торфяных частиц и ее экспериментальное подтверждение [Текст] / Ю.Ф. Снежкин, Д.Н. Коринчук // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 134-137.
3. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов [Текст] / В. И. Муштаев. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
4. Долинский, А. А. Кинетика и технология сушки распылением [Текст] / А. А., Долинский, К. Д. Малецкая, В.В. Шморгун. – К.: Наук. Думка, 1987. – 221 с.
5. Коринчук, Д. М. Фізична модель високотемпературного сушіння біомаси і торфу / Д. М. Коринчук, М. М. Безгін, М. А. Пашенько // Збірник наукових статей «XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Вдосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв» ОНАХТ /Мін. Освіти і науки України. – Одеса: ОНАХТ, 2016. – С. 125 – 128.
6. Гнеушев, В. О. Брикетування торфу [Текст] / В. О. Гнеушев – Рівне: НУВГП, 2010. – 166 с.

УДК: 628.16.045.5–047.58:628.165

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА

Тришин Ф.А к.т.н, Трач А.Р. магистр
Одесская национальная академия пищевых технологий

APPROACHES TO MODELING OF THE PROCESS OF FROZENING ICE BLOCK

Trishin F.A.Sc., Trach A.R. master
Odessa National Academy of Food Technologies

Аннотация: Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей. Было проведено численное моделирование влияния пористости на процесс кристаллизации, установлено, что пористость блока льда является значительным фактором, влияющим на формирование двухфазного слоя. Были предложены пути моделирования пористости блока льда с использованием стохастических методы моделирования, теории фракталов и теории перколяции.

Abstract: Research of heat transfer process is very difficult in the real world, due to the complexity and nonstationarity this processes. That is why theoretical analysis and theoretical models are so important. The numerical model of heat transfer process was obtained in current work. Various models have been proposed for modeling porosity

Ключевые слова: моделирование, кристаллизация, пористость, концентрация, температура, теплопередача, перколяция, фракталы.

Keywords: modeling, crystallization, porosity, concentration, temperature, heat transfer, percolation, fractals.

Введение. Несмотря на то, что пресная вода составляет незначительную долю водных ресурсов Земли, она определяет уровень и саму возможность жизни на суше. Качество пресной воды имеет большое значение для человека и его хозяйственной деятельности. Лишь одна сотая доля всех мировых ресурсов пресных вод может быть основным источником водоснабжения человечества. Ежегодно в мире тратится 5000 км³ пресной воды, или 11% годового стока всех рек мира. Доступные природные ресурсы пресной воды крайне неравномерно размещены на нашей планете, значительная часть крупнейших рек мира протекает в малонаселенных регионах. В густонаселенных областях относительно немного больших рек, и их воды интенсивно используются. Все это усложняет водоснабжения человечества, на текущий момент примерно одна треть населения Земли испытывает дефицит пресной воды [1,2].

К 2025 году в связи с ростом численности населения, ситуация существенно ухудшится. Такие перспективы значительно повышают важность очистки воды. До сих пор основным методом очистки воды остается ее дистилляция, однако энергетическая эффективность такого метода не слишком высока. В Украине принят Закон об энергосбережении [3], который стимулирует потребителей к рациональному использованию и экономному потреблению первичной и преобразованной энергии и природных энергетических ресурсов. В связи с этим широко распространяются альтернативные способы очистки воды. Возрастает интерес к использованию низкотемпературных технологий водоподготовки, и, в частности, к технологиям блочного вымораживания. Для установок этого типа характерны простота конструкции, компактность и энергетическая эффективность. Принцип блочного вымораживания устраняет системные потери холода, которые характерны для традиционных установок криоцентрирования [4].

Моделирование теплопередачи при направленной кристаллизации. Поскольку качество процесса напрямую зависит от качества управления им, возникает проблема управления процессами теплопередачи при направленной кристаллизации. Исходя из требований энергоэффективности, исследование методик управления процессом теплопередачи при направленной кристаллизации представляет большое научное и практическое значение для решения проблем обеспечения чистой водой. Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический

анализ и построение моделей. В данной работе рассмотрим подходы к моделированию процесса вымораживания, а также рассмотрим возможные модели влияния пористости на процесс вымораживания.

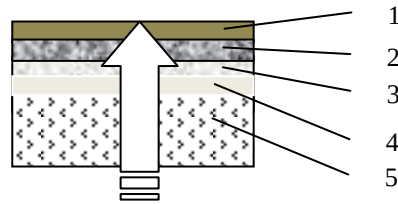


Рис.1. Физическая модель процесса вымораживания.

При направленной кристаллизации на горизонтальной поверхности 1, температура которой ниже криоскопической температуры, формируется подложка в виде твердой фазы 2. Ниже растет двухфазный слой 3, состоящий из льда и раствора. Поверхность двухфазной зоны и раствор 5 разделяет пограничный слой 4.

Управление процессом направленной кристаллизации основано на обеспечении необходимых условий формирования двухфазного слоя. Разность температур раствора и поверхности 1 определяют плотность теплового потока q и массовый поток льда $M_{\text{л}}$. Сложность моделирования процессов по схеме (рис.1) заключается не только фазовыми переходами, но и изменением по высоте слоя структуры двухфазного слоя. Нельзя игнорировать градиенты температур, концентраций и пористости по высоте слоя. Более того, эпюры этих параметров имеют нелинейный характер. От величины температуры в точке зависит концентрация раствора и пористость, а эти параметры определяют термическое сопротивление, т.е. производительность по росту льда и распределение температур в слое. Таким образом, задача является нелинейной, нестационарной и осложненной фазовыми переходами [5,6].

В идеальном теплофизическом представлении процесс направленной кристаллизации должен проходить при выращивании подложки с нулевой пористостью. Такой консервативный способ управления процессом должен протекать при минимальной разнице температур, практически при криоскопической температуре. Теоретически обеспечится нулевая пористость, однако скорость формирования блока льда будет бесконечно низкой. Любые методы интенсификации приведут к росту скорости намораживания, но ценой получения пористой структуры. На рисунке 2 представлена фотография блока льда, на которой заметна его пористая структура.



Рис 2. Пористая структура блока льда полученного в установке блочного вымораживания.

В процессе кристаллизации температура (t_p), концентрация (X_p) и пористость (ϵ) каждого среза слоя меняются, поэтому:

$$\lambda_e(h) = \epsilon(h) \cdot \lambda_p(t, X_p) + (1 - \epsilon(h)) \cdot \lambda_l(t) \quad (1)$$

Поскольку найти аналитическое решение проблемы достаточно проблематично, логичным кажется провести численное моделирование процесса кристаллизации. Полученное семейство графиков представлено на рисунке 3.

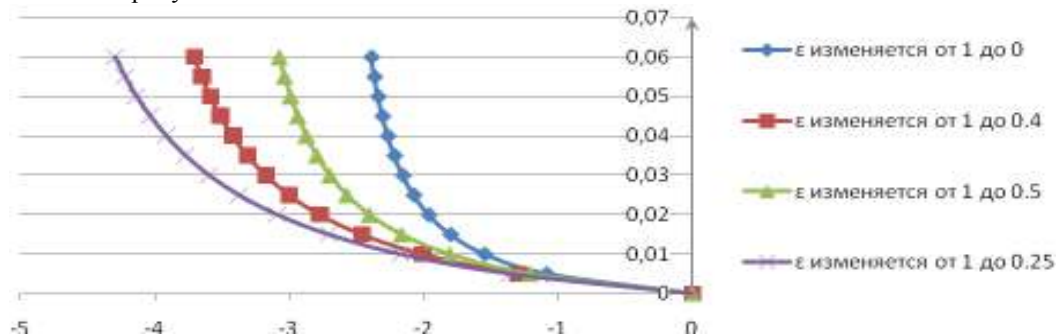


Рис. 3. Графики зависимости $t(h)$ когда значение ε изменяется по линейному закону.

По приведенным графикам можно сделать вывод, что возможность эффективного воздействия на процесс кристаллизации во многом определяется достоверностью представлений о строении пористой структуры льда, поэтому актуальной является задача моделирования этой структуры и определение ее влияния на процессы тепло- и массообмена. Как показывает обзор литературы, эта проблема еще не решена в полной мере.

Подходы к моделированию пористых систем. Выделяют несколько характерных моделей физического моделирования пористых систем [7], отражающих как корпускулярное строение пористых систем, так и губчатое. Исходя из этого все модели делятся на глобулярные и капиллярные.

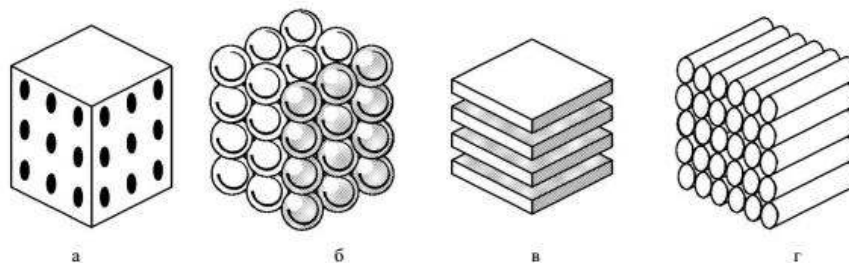


Рис. 4. Некоторые модели пористых систем: а - цилиндрические капилляры, б - полуупакованные сферы, в - параллельные пластины, г - полуупакованные цилиндры.

В глобулярных моделях (рис. 4 б, в, г) основой являются единичные элементы геометрической формы, уложенные определенным образом, поры отражены в глобулярных моделях как пустоты между элементами (глобулами), а плотность укладки глобул отображается коэффициентом их упаковки и зависит от формы глобул и способа их упаковки.

В капиллярных моделях свободный объем представляется как совокупность капилляров различного сечения, протяженности и ориентации в пространстве. Простой капиллярной моделью является губчатая модель с цилиндрическими прямыми капиллярами, которые не пересекаются (Рис. 4а). Такая модель, однако, не учитывает естественных для реальных структур непрямолинейности и неодинаковости сечений пор, поэтому для уточнения модели и учета свойств капилляров модели последних.

Следует отметить, что приведенные выше способы моделирования удовлетворительно работают только для промышленно созданных материалов, поскольку для них заранее известны основные размеры частиц, эквивалентный радиус пор и технология производства материала. Структуры природных веществ находятся под влиянием разнообразных случайных факторов, что значительно усложняет построение достоверной физической модели. В такой ситуации целесообразно применять стохастические методы моделирования, теорию фракталов и теорию перколяции.

Использование фракталов при изучении пористых структур базируется на их свойстве самоподобия. Это означает объект, в точности или приближенно совпадающий с частью себя самого, то есть целое

имеет ту же форму, что и одна или более его частей. Опираясь на вышесказанное, можно представить пористую структуру некоторым фракталом, например губкой Менгера [8], представленной на рис 5.



Рис 5. Губка Менгера - геометрический фрактал, один из трехмерных аналогов ковра Серпинского, изображена на 4й итерации.

Следует учитывать, что исследование природных объектов сопряжено с большими трудностями, поскольку у них, как правило, отсутствует точное самоподобие, поэтому используется понятие топологического самоподобия или самоафинности. Нужно принимать во внимание, что в общем случае количество итераций фрактала – бесконечно, однако при моделировании реальных объектов это число ограничено.

Большое значение при моделировании пористости природных объектов приобретает также теория перколяции [9]. Формирование современного математического аппарата этой теории, а также терминологии связывают с работой Бродбента и Дж. Хаммерсли от 1957 года, в которой они рассматривают общую задачу о начальной фазе течения некоторой жидкости через случайно неоднородную проницаемую среду. Простейшей моделью, с которой обычно начинается рассмотрение критических показателей перколяционного процесса, является регулярный четырехсвязный планарный граф, достижимость произвольного выделенного узла в котором задается некоторой случайной величиной P_{ij} . Пример такого перколяционного процесса на конечной решетке представлен на рисунке 6.

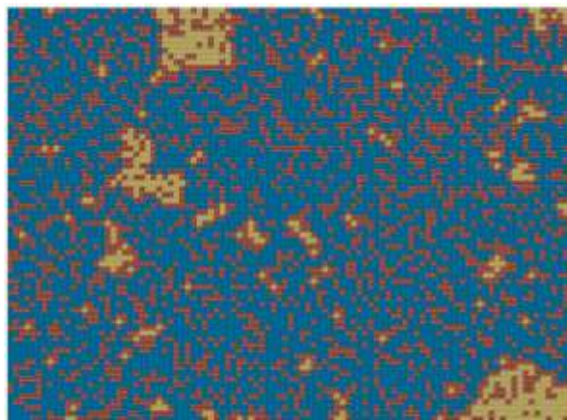


Рис 6. Перколяционный кластер (решетка размером 100x100 узлов, $P_{ij}=65\%$)

Используя фрактальный анализ стохастической структуры возможно определить некоторые усредненные параметры, характеризующие ее строение, что позволит использовать их в практических расчетах для определения показателей тепло- и массообмена.

Выводы

1. Было установлено, что пористость структуры льда оказывает значительное влияние на процессы тепло- и массообмена. Таким образом, актуальной становится теоретическая разработка методов для исследования и моделирования пористости.
2. Штучные пористые структуры могут быть промоделированы методами геометрического моделирования, которые, однако, становятся непригодными к использованию при появлении стохастических возмущений.

3. Природные образования носят стохастическую и фрактальную природу, поэтому целесообразным выглядит применение для исследований аппарата фрактальной геометрии и теории перколяции.

Литература

1. Мидоренко Д. А. Мониторинг водных ресурсов: Учеб. пособие. / Д. А. Мидоренко, В. С. Краснов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – 77 с.
2. Хвесик М. А. Водні ресурси – інвестиція сьогодення і перспектива майбутнього / М. А. Хвесик, В. М. Мандзик. // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – №1. – С. 2–8.
3. Закон України «Про енергозбереження» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>.
4. Антипов С. Т. Тепло- и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, В. Ю. Овсянников. – Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.
5. Бурдо О. Г. Процессы кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2014. – С. 80–86.
6. Бурдо О. Г. Моделирование процесса кристаллизации воды в ультразвуковом поле / О. Г. Бурдо, Ф. А. Тришин, А. Р. Трач. // Харчова наука і технологія. – 2015. – С. 75–80.
7. Методи моделювання пористих середовищ, що проводять / П. Ф.Буданов, Ю. С. Олійник, А. Г. Сіліна, А. М. Чернюк. // Системи обробки інформації. – 2015. – №5. – С. 51–55.
8. Menger sponge [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Menger_sponge.
9. Москалев П. В. Математическое моделирование пористых структур / П. В. Москалев, В. В. Шитов. – Москва: Физматлит, 2007. . – 120 с.

УДК 621.75:541

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор, Давар Ростами Пур, фирма «D.R.P.», Teheran, Iran, Масельская Я.А., магистрант факультета ЭТОиТД, ОНАПТ

MATHEMATICAL MODEL OF THE DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS

Burdo O.G., Dr. Tech. Sci., Professor, Davar Rostami Pur, firma "D.R.P.",
Teheran, Iran, Maselskaya Ya.A., graduate student of the Faculty of ETE & TD,
ONAPT

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции на рынке соков. Анализируются перспективы гранатового сока в Украине. Сравниваются современные технологии концентрирования соков. Показаны преимущества низкотемпературных методов концентрирования. Обоснованы перспективы технологий блочного вымораживания для получения концентрированного гранатового сока.

Abstract. The world trends in the juice market are considered. The prospects of pomegranate juice in Ukraine are analyzed. Contemporary technologies of juicing are compared. The advantages of low-temperature methods of concentration are shown. The prospects of block freezing technologies for obtaining concentrated pomegranate juice are grounded.

Ключевые слова: гранатовый сок, концентрирование сока, низкотемпературные методы концентрирования, технологии блочного вымораживания.

Key words: pomegranate juice, juice concentration, low-temperature methods of concentration, technologies of block freezing.

Введение. Представляется, что важным параметром, определяющим эффективность процесса блочного вымораживания, является форма кристаллизаторов и их компоновка в емкости концентратора.

Первые конструкции блочных вымораживателей использовали эффект «термического парадокса» и состояли из пучка стержневых испарителей [1], расположенных коридорным либо шахматным пучком (рис.1,а). В дальнейшем [2] была предложена оригинальная форма испарителей (рис.1,б), которые предназначались для более полного заполнения льдом емкости. В установках большой производительности использовались пластинчатые кристаллизаторы [3], которые оказались удобными и в монтаже, и при эксплуатации (рис.1,в). Однако во всех этих конструкциях объем балластной жидкости (а) в емкости оставался значительным. А это не позволяло серьезно повышать концентрацию раствора. Вообще, задача оптимизации компоновки аппарата блочного вымораживания серьезно не ставилась.

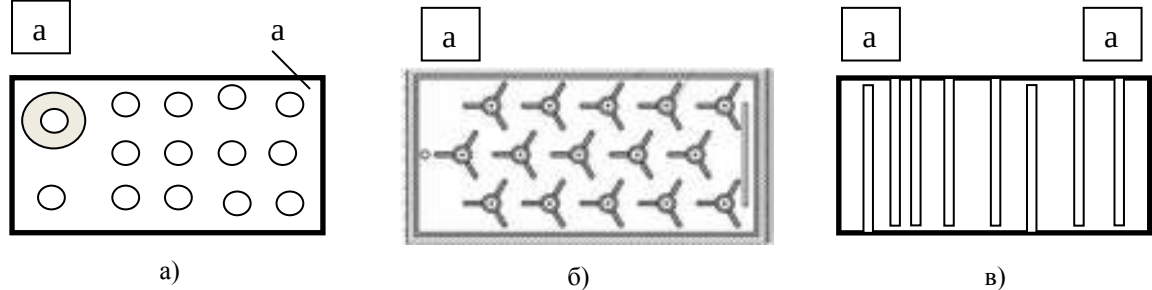


Рис. 1. Схемы компоновок испарителей

Общими при экспериментальном исследовании различных по конструктивному исполнению испарителей [1 - 3] оказались закономерности формирования блока льда и структуры раствора в процессе криоконцентрирования. Несмотря на то, что рост массы льда (M_l) во времени снижается и имеет вид выпуклой экспоненты (рис.2,а), характер роста концентрации раствора (X_p) во времени выглядит параболой (рис.2, б). При этом при приближении отношения объемов льда (V_l) и исходного раствора (V_p) к 1, скорость роста X_l стремительно повышается. Этот факт был отмечен авторами [3] и дал основание считать, что конструкция аппарата должна реализовывать такие возможности.

На основе проведенного анализа в данной работе выдвигается научное положение: «При использовании плоско - параллельных кристаллизаторов рациональное соотношение шага между кристаллизаторами, компоновка аппарата (расстояния от торцов кристаллизатора до стенок емкости и дна), могут обеспечить максимальную степень концентрирования раствора при снижении термического сопротивления системы поверхность кристаллизатора - раствор за счет организации направленной кристаллизации, которая проходит при росте площади поверхности раздела фаз».

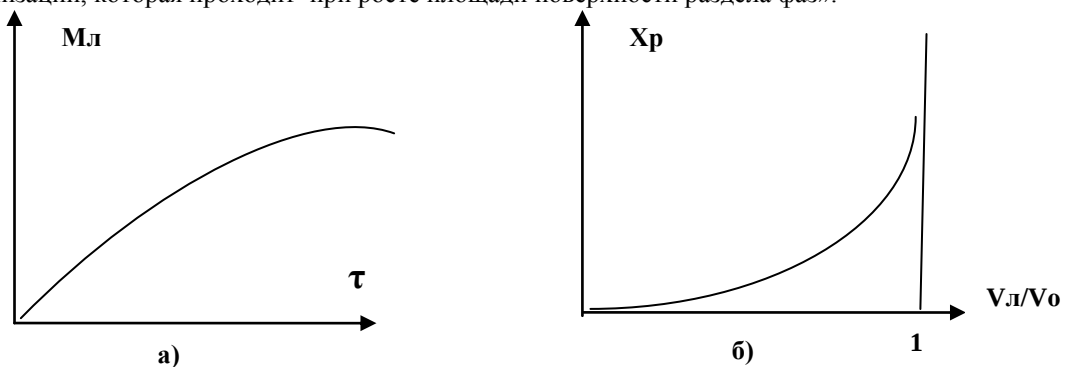


Рис.2. Типичные картины кинетики: формирования массы льда (а) и изменения концентрации раствора (б)

Естественно, необходимым условием реализации выдвинутой гипотезы является согласование конструктивных параметров испарителей и концентраторов с режимными характеристиками процесса.

Вторая идея научного положения связана с предложением организовать процесс кристаллизации льда с нарастанием внешней поверхности блока льда. Это приведет к росту поверхности фазового контакта и будет способствовать реализации эффекта «термического парадокса», суть которого для стержневых кристаллизаторов изложена авторами [1, 3].

Результаты исследований. В настоящей работе впервые предлагается использовать идею «термического парадокса» для пластинчатых кристаллизаторов. Иллюстрация этого положения дана на рис.3. Показано, что работает не только фронтальные поверхности кристаллизатора, но и торцевые. При этом, аппарат проектируется так, чтобы расстояния от боковых торцов до стенок емкости кристаллизатора, и от нижнего торца до дна емкости равнялись конечному значению толщины блока льда (δ). Тогда (рис.3) высота блока льда станет $(L + \delta)$, а ширина – $2(B + \delta)$. А в прежних конструкциях она рассматривалась равной высоте кристаллизатора (L).

Таким образом, предлагаемое решение сохраняет достоинства пластинчатых испарителей (их технологичность и высокая производительность) и использует эффект «термического парадокса». Проведем анализ термических сопротивлений по схеме (рис.4). Та часть объема льда, которая растет на фронтальной поверхности испарителя, имеет традиционные недостатки: с повышением толщины слоя его термическое сопротивление (R_l) растет. Однако организуется кристаллизация и на торцевых поверхностях испарителя, формируется дополнительный объем льда, который характеризуется ростом внешней поверхности. А это – предпосылки к снижению термического сопротивления конвективного теплообмена (R_k) и термического сопротивления твердой фазы (R_l). В результате появляется возможность достижения максимальной степени концентрирования раствора, снижения времени процесса и энергетических затрат при сохранении большой производительности аппарата.

Рассмотрим методы аналитического моделирования кинетических зависимостей блочного вымораживателя.

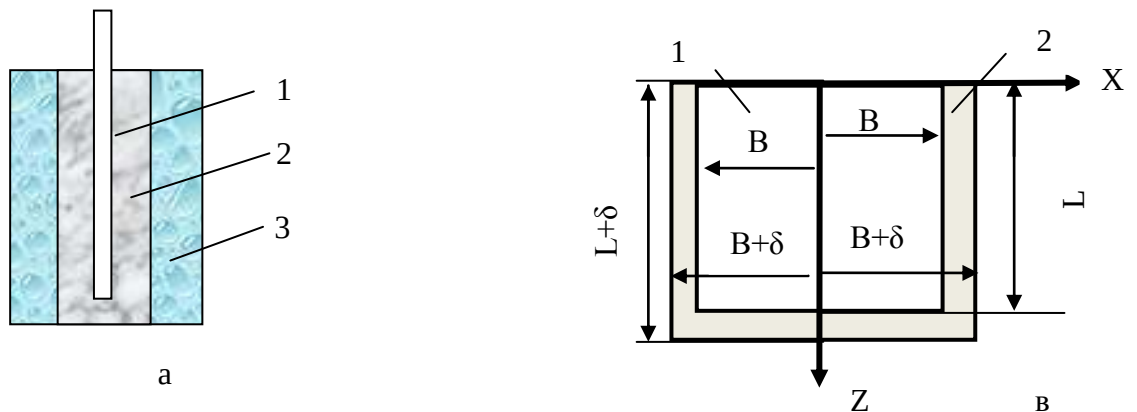


Рис. 3. Постановка задачи моделирования: а – физическая модель; в – геометрическая модель (1 – поверхность испарителя, 2 – поверхность льда).

Теплофизическая модель предлагаемого решения приведена на рис.4.

Особенности сырья определяют: теплоемкость (c_s), плотность (ρ_s), теплопроводность (λ_s) и вязкость (ν_s). Исходной информацией является: масса загружаемого сока (G_c), его температура (t_n) и концентрация (X_c). Характер процесса вымораживания определяют: удельная теплота кристаллизации (Ω_v) и криоскопическая температура (t_{kr}) и толщина блока льда (δ_l).

Основные характеристики аппарата: толщина (v), высота (L), и половина ширины испарителя (B), шаг между ними (s) и их число (z), объем загружаемого продукта (V_n). Параметры холодильной системы (XC): потребляемая электрическая мощность (N_e), температуры кипения (t_o) и конденсации (t_{kd}) и электрический холодильный коэффициент (η_e).

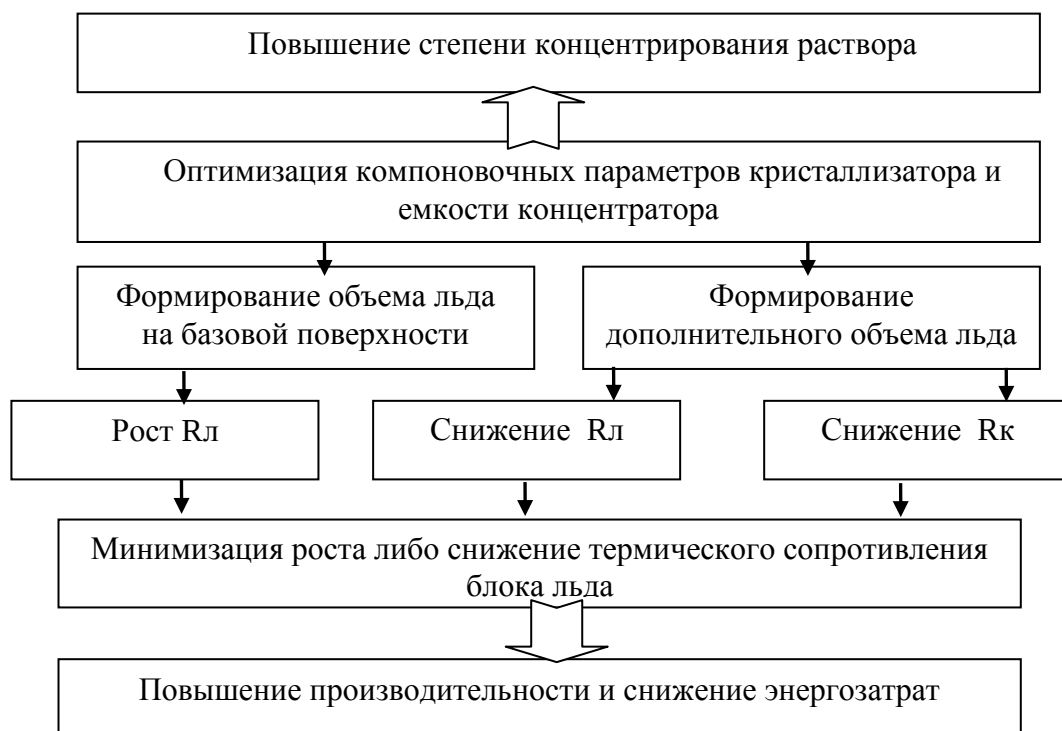


Рис.4. Теплофизическая модель предлагаемого блочного вымораживателя.

Параметрическая модель. Сводку всех ключевых факторов, определяющих гидродинамические, теплообменные и диффузионные взаимодействия в аппарате, включает параметрическая модель (рис.5).

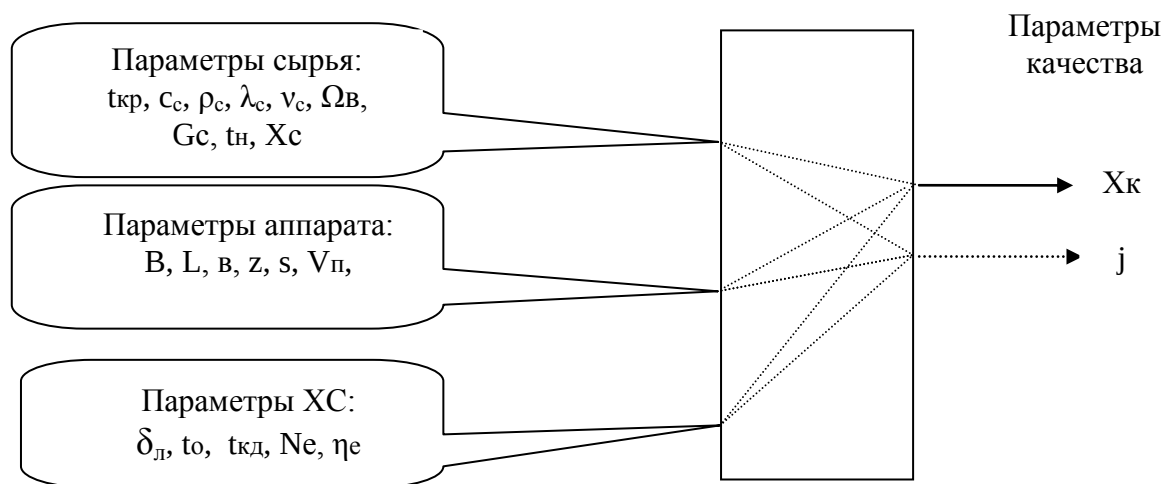


Рис.5. Параметрическая модель блочного вымораживателя

Параметрами качества считаем значение конечной концентрации сока (X_k) и удельные расходы энергии (j , Дж/кг готового продукта). Задача дальнейших исследований – установить взаимные связи между комплексами этих параметров.

Модель термического парадокса. Проведем анализ теплопередачи при работе инновационной установки блочного вымораживания. Суммарное значение термического сопротивления всей цепочки теплопередачи «раствор – поверхность блока льда – лед – контакт блока с испарителем – стенка

испарителя – кипение холодильного агента» определяется (рис.2.4) по последовательно – параллельной схеме. Можно исключить из анализа термические сопротивления контакта и процесса кипения, которые в процессе вымораживания остаются неизменными и имеют низкие значения. Суммарное термическое сопротивление (R_c) определяется последовательной цепочкой «блок льда (R_l) – конвекция от раствора к поверхности льда (R_k)». В самом блоке льда тепловые потоки проходят (рис.2.3) по параллельной схеме: через базовое сечение (R_b) и через дополнительное, постоянно растущее сечение (R_d).

$$R_c = R_b - R_d + R_k \quad (1)$$

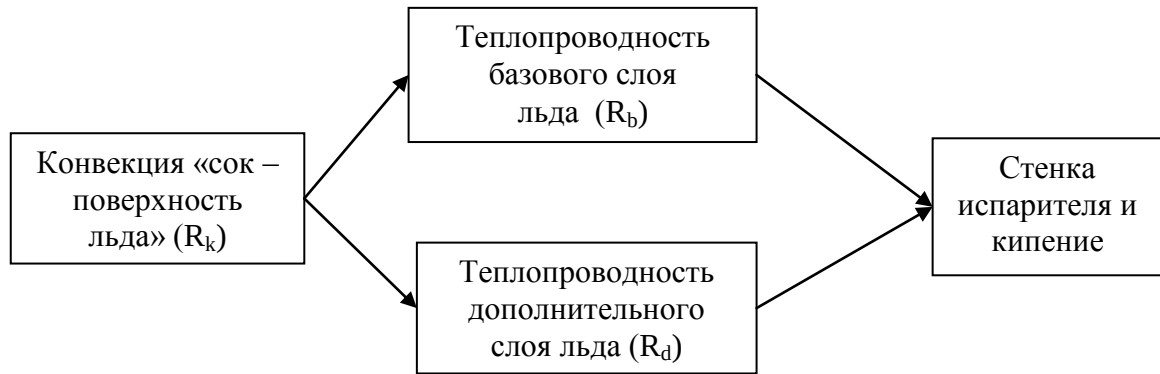


Рис.6. Схема теплопередачи

На основе (рис.6) соотношение (1) можно представить в виде:

$$R_c = \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{2LB} - \frac{\delta_l}{\lambda_l} \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta} + \frac{1}{\alpha_k} \frac{1}{(L+\delta)2(B+\delta)} \quad (2)$$

Первое слагаемое (2.2) увеличивается с ростом толщины блока льда (δ), однако второе снижает термическое сопротивление блока, а третье – с ростом (δ) постоянно снижается (рис.7).

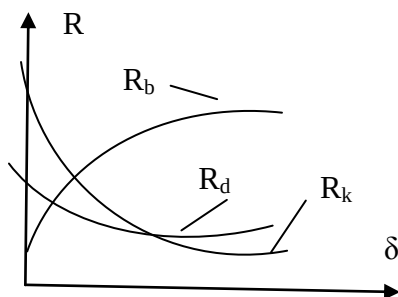
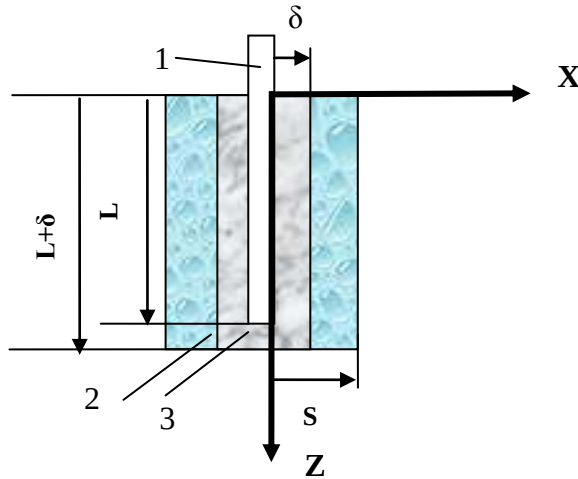


Рис.7. Зависимость R от δ

Количественные значения составляющих термических сопротивлений определяются конкретными размерами испарителя и толщины блока льда. Предварительные оценки показывают, что суммарный эффект ожидается до 20%. Представляется, что температура кипения холодильного агента и толщина блока льда могут использоваться для «сшивания» моделей – тепломассобменной и энергетической.

Кинетические модели процесса вымораживания. Общая модель процесса, изложенная в [1], справедлива для задачи, которая поставлена на рис.8.



- 4- плоский испаритель высотой L ,
толщиной b и шириной $2B$.
5- сок;
6- 3 – блок льда.
 S - зона действия испарителя;
 δ - толщина блока льда.

Площадь базовой поверхности: $F_b = 2BL$
Площадь дополнительной поверхности льда:
 $F_d = 2\delta L + Lb + 2\delta(B + \delta)$

Рис.8 - Постановка задачи моделирования

Необходимым условием процесса направленной кристаллизации является организация теплопередачи по цепи «сок – блок льда – стенка испарителя (кристаллизатора) – холодильный агент». Процесс испарения в плоских испарителях подробно изучен в работах В.П. Мордынского [3]. Конструкция такого испарителя оптимизирована, эффективная организация процесса испарения позволяет пренебречь термическим сопротивлением процесса испарения, считать, что поверхность испарителя имеет одинаковую температуру. Поэтому, на схеме (рис.8) рассматривается цепочка теплопередачи «сок – блок льда – стенка испарителя».

При записи системы уравнений будем считать, что распределение температур есть только по одной координате - X . Запишем для осесимметричной задачи в декартовых координатах уравнения энергии, неразрывности, движения с соответствующими граничными условиями и уравнениями состояния.

Для стенки кристаллизатора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{CT}}{\partial \tau} = a_{CT} \left(\frac{\partial^2 t_{CT}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3)$$

Условия однозначности включают начальные условия (4), граничные условия III рода (5) «стенка испарителя – холодильный агент», и IV рода (6 – «стенка испарителя - лед».

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{CT1} = t_{CT0} = t_x, \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (4)$$

$$-\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) - \alpha_x (t_{CT} - t_0) = 0, \quad \text{при } x = x_0 \quad (5)$$

$$\lambda_{CT} \left(\frac{\partial t_{CT}}{\partial x} \right) + \lambda_L \left(\frac{\partial t_L}{\partial x} \right) = 0, \quad \text{при } x = x_1 \quad (6)$$

Для блока льда уравнение энергии (3), записывается при следующих условиях однозначности (8):

$$\frac{\partial t_L}{\partial \tau} = a_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = x_1 \quad t_L &= t_{CT1} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_L &= t_{ЛГ} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (8)$$

В пределах объема продукта нестационарное температурное поле выражается в виде:

$$\frac{\partial t_{II}}{\partial \tau} + \frac{\partial t_{II}}{\partial x} w_x + \frac{\partial t_{II}}{\partial y} w_y + \frac{\partial t_{II}}{\partial z} w_z = a_{II} \left(\frac{\partial^2 t_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

где компоненты скорости движения жидкости определяются уравнением Навье-Стокса:

$$\rho w \operatorname{grad} w = \rho g - \operatorname{grad} P + \mu \nabla^2 w \quad (10)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad t_{\Pi} &= t_{\Pi\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{\Pi} &= t_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad x_1 \leq x \leq \delta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{Л}} \left(\frac{\partial t_{\text{Л}}}{\partial x} \right) - \alpha_{\Pi} (t_{\Pi} - t_{\text{ЛГ}}) = q_{\text{КР}} \quad (12)$$

Энергетический баланс процесса кристаллизации:

$$c_{\text{РЛ}} \rho_{\text{Л}} \frac{d t_{\text{Л}}}{d \tau} = \lambda_{\text{Л}} \frac{d^2 t_{\text{Л}}}{d x^2} + \frac{d M_{\text{Л}}}{d \tau} \frac{1}{V} \Omega \quad (13)$$

а удельный тепловой поток, который необходим для охлаждения продукта:

$$c_{\text{РП}} \rho_{\Pi} \frac{d t_{\text{Л}}}{d \tau} = q(\tau) \quad (14)$$

Соотношение (2.17) получено при допущении, что тепловой поток от диссипации энергии движения жидкости у поверхности блока льда пренебрежимо мал (а это справедливо в условиях свободной конвекции), кристаллизуется один компонент – вода, а поток массы нормируется объемом блока. Предполагаем, что массовый поток определяется только уравнением Фика:

$$\frac{d^2 M_{\text{Л}}}{d \tau^2} = \beta [C_{\text{КР}}(t_{\text{ЛГ}}) - C_{\Pi}] \frac{\rho_{\text{Л}}}{\rho_{\Pi}} \frac{d F_{\text{ЛГ}}}{d \tau} \quad (15)$$

Условия однозначности для объема жидкости:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, \quad C_{\Pi} &= C_{\Pi\Pi} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = \delta \quad C_{\Pi} &= C_{\Pi\Gamma} \\ \text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad C_{\Pi} &= C_S \\ \text{при } \tau > 0, \quad \delta \leq x \leq S \end{aligned} \quad (16)$$

Одномерное нестационарное поле концентраций сухих веществ в блоке льда определяется уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial x} w_x = D_{\text{Л}} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}_{\text{Л}}}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

Наружные поверхности стенок концентратора теплоизолированы, но влияние окружающей среды необходимо учитывать. Условия на границе со стенкой концентратора со стороны продукта:

$$\text{при } \tau > 0, \quad x = S \quad t_{\Pi} = t_S \quad (18)$$

$$-\lambda_{\text{СТК}} \left(\frac{\partial t_{\text{СТК}}}{\partial x} \right) + \alpha_{\text{СК}} (t_{\text{СТК}} - t_{\Pi}) = 0 \quad (19)$$

Для стенки концентратора уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{\text{СТК}}}{\partial \tau} = a_{\text{СТ}} \left(\frac{\partial^2 t_{\text{СТК}}}{\partial x^2} \right), \quad \tau > 0, \quad (20)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{\text{СТК1}} = t_{\text{СТК2}} = t_{\text{ОС}} \quad (21)$$

Для слоя тепловой изоляции:

$$\frac{\partial t_H}{\partial \tau} = a_H \left(\frac{\partial^2 t_H}{\partial x^2} \right), \tau > 0, \quad (22)$$

условия однозначности

$$\text{при } \tau = 0, \quad t_{H1} = t_{H2} = t_{OC}, \quad (23)$$

Влияние окружающей среды проходит при ГУ III рода:

$$\lambda_H \left(\frac{\partial t_H}{\partial x} \right) + \alpha_C (t_{OC} - t_H) = 0 \quad (24)$$

Теплопередача от слоя тепловой изоляции к наружной стенке концентратора проходит при ГУ IV рода:

$$\lambda_{CTK} \left(\frac{\partial t_{CTK}}{\partial x} \right) + \lambda_H \left(\frac{\partial t_H}{\partial x} \right) = 0 \quad (25)$$

Представленную модель необходимо дополнить уравнениями связи:

$$\lambda_{CT} = \lambda(t_{CT}); \lambda_L = \lambda(t_L); \lambda_P = \lambda(t_P, C_P); \quad (26)$$

$$a_P = a(t_P, C_P); a_{CT} = a(t_{CT}); a_L = a(t_L); \quad (27)$$

$$\rho_P = \rho(t_P, C_P); \rho_L = \rho(t_L); \mu_P = \mu(t_P, C_P); \quad (28)$$

$$D = D(t_P) \quad (29)$$

Полученная модель вымораживающего устройства (3) ... (29) представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Это нестационарная, сопряженная гидродинамическая, тепловая и массообменная задача, осложненная подвижной границей раздела «лед - продукт», неопределенностью возможных внешних силовых воздействий в соотношениях. Для замыкания системы требуются соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи. Основные сложности численного моделирования связаны с решением проблем гидродинамической ситуации в объеме продукта.

Наиболее рациональным решением поставленной задачи в настоящее время является применение возможностей теории подобия. На первом этапе следует конкретизировать способ и параметры воздействия на процесс кристаллизации.

Отличия начинаются в конкретизации чисел Фурье и Био. Их необходимо модернизировать в соответствии с рис. 8. Тогда, известное соотношение должно учесть, что форма слоя – пластина. Поэтому $n = 0$ [4]. С учетом приведенных уточнений определяется безразмерное время вымораживания:

$$Fo = \frac{Ph}{2} \left(1 + \frac{2}{Bi_T} \right) \quad (30)$$

где Bi_T – тепловое число Био, смысл которого заключается в соотношении внутреннего термического сопротивления и внешнего. По сути, это отношение термических сопротивлений микро- и макрокинетики. Поскольку, форма блока льда отличается, то требуется корректировка и числа Био. Более того, следует учесть и фактор роста поверхности блока во времени, т.е. обосновать гипотезу «термического парадокса». Согласно (2) внутреннее термическое сопротивление состоит из 2 слагаемых.

$$R_L = \frac{\delta_L}{\lambda_L} \left[\frac{1}{2LB} - \frac{1}{L\delta + 2(B+\delta)\delta_L} \right] \quad (31)$$

Первое слагаемое постоянно растет из-за увеличения δ . А значение второго во времени снижает общую величину термического сопротивления блока льда.

Внешнее термическое сопротивление конвективного теплообмена «сок – поверхность блока льда» определяется коэффициентом теплоотдачи (α) и растущей наружной поверхностью блока льда.

$$R_K = \frac{1}{\alpha_K} \frac{1}{(L+\delta)2(B+\delta)} \quad (32)$$

Тогда, число Био для задачи (рис.8) запишется так:

$$Bi = \frac{R_k}{R_d} = \frac{\alpha_k}{\lambda_d} 2(L + \delta)(B + \delta) \left(\frac{\delta_d}{2LB} - \frac{\delta_d}{L\delta + 2(B + \delta)} \right) \quad (33)$$

Таким образом, могут быть определены задачи и методы экспериментального моделирования процессов вымораживания.

Выводы.

3. Перспективным путем разделения пищевых растворов являются принципы криоконцентрирования. В отличие от схем объемной кристаллизации, в аппаратах блочного вымораживания обеспечивается эффект направленной кристаллизации, что способствует формированию твердой фазы с плотной упаковкой кристаллов льда.

4. Конструкции аппаратов блочного вымораживания имеют резервы для совершенствования, повышения интенсивности массопереноса при кристаллизации, роста производительности и снижения энергоемкости. Разработана математическая модель кинетики и энергетики процесса кристаллизации в аппаратах вымораживания. На основе методов теории подобия нестационарная трехмерная модель направленной кристаллизации приведена к форме, удобной для инженерных расчетов.

Литература.

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
2. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.
3. Гунько П.А. Исследование и разработка технологии извлечения белковых компонентов из творожной сыворотки низкотемпературными методами. /дис. к.т.н., 2014, Кемерово 2014 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (ФГБОУ ВПО «КемТИПП»).
4. Мальцева О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3 с.118-123 / ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
5. Овсянников В.Ю., Краминова Ю.С., Кириченко Т.С., Москаленко А.С. Методика определения оптимального температурного режима в кристаллизаторах-криоконцентраторах // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 43-44; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14704> (дата обращения: 01.01.2017).
6. Бостынец Н.И., Овсянников В.Ю. Исследования и разработка установки для криоконцентрирования вишневого сока.

УДК66.047.55.086.2-035.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ

Бурдо О.Г., Маренченко Е.И., Пилипенко Е.А., Балагура В.В.

MATHEMATICAL MODEL OF MICROWAVE BAND DRYER

Burdo O.G., Marenchenko E.I., Pilipenko E.A., Balagura V.V.

Abstract. The prospects of electromagnetic energy supply technologies for drying food products are shown. The scheme of belt dryer with infrared and microwave energy generators is considered. The hardware-processor circuit, the physical and parametric model of the dryer are presented. On the basis of the phenomenological approach, a mathematical model of the drying process in an electromagnetic field is compiled.

Аннотация. Показаны перспективы электромагнитных технологий подвода энергии при сушке пищевых продуктов. Рассмотрена схема ленточной сушилки с инфракрасными и микроволновыми генераторами энергии. Приведены аппаратурно-процессовая схема, физическая и параметрическая

модель сушилки. На основе феноменологического подхода составлена математическая модель процесса сушки в электромагнитном поле.

Введение. Ленточная СВЧ и ИК сушилка – это инновационное решение для сушки дисперсных зерновых материалов и плодов ягод, фруктов и овощей. Благодаря комбинации СВЧ и ИК излучения появляется возможность существенно сократить время процесса сушки, его энергоёмкость, улучшить качество и сохранить структуру высушенного продукта.

СВЧ излучение, проникая в глубину продукта, влияет на биполярные молекулы воды, приводя их в движение. В следствии этого движения, молекулы воды сталкиваются и трутся друг о друга, производя тепловую энергию. При повышении температуры влага в продукте расширяется, происходит парообразование, создается давление внутри продукта, влага стремится к поверхности продукта.

ИК излучение действует на поверхность продукта, удаляя влагу, которая была доставлена СВЧ излучением из глубины продукта.

Данный метод сушки минует фазу прогрева теплоносителя, действуя непосредственно на влагу в глубине продукта благодаря электромагнитному полю, что позволяет максимально сократить потери энергии в окружающую среду и на нагрев продукта (так как электромагнитное поле греет непосредственно воду внутри продукта).

В период сушки, температура продукта не превышает допустимых норм термической обработки продуктов питания, что так же положительно сказывается на внешнем виде высушенного продукта.

Схема микроволновой ленточной сушилки в электромагнитном поле

СВЧ и ИК сушилка (рис. 1) состоит бункера загрузки – 1, через который сырой продукт поступает на ленточный конвейер – 2, приводимый в движение приводом – 3, далее продукт продвигается к модулю СВЧ – 4 и модулю ИК – 5, на технологической линии размещено по три модуля, далее высушенный продукт выгружается в бункер выгрузки – 6. СВЧ модуль состоит из магнетрона – 7, вентилятора – 8, высоковольтного трансформатора – 9 и компрессора – 10. ИК модуль состоит из ИК излучателя – 11. При помощи панели управления – 12 происходит настройка подводимой мощности СВЧ излучения – 13, время работы СВЧ модуля устанавливается на 10 минут, 1 минуту и 10 секунд при помощи кнопок – 14, 15, 16 соответственно, данные настроек мощности и времени выводятся на аналоговый датчик – 17, модуль приводится в действие кнопкой «пуск/стоп» - 18. На механическом датчике – 19 отображается мощность ИК излучения, регулируемая при помощи переключателя мощности – 20. Корпус установки – 21 покрыт изоляцией – 22.

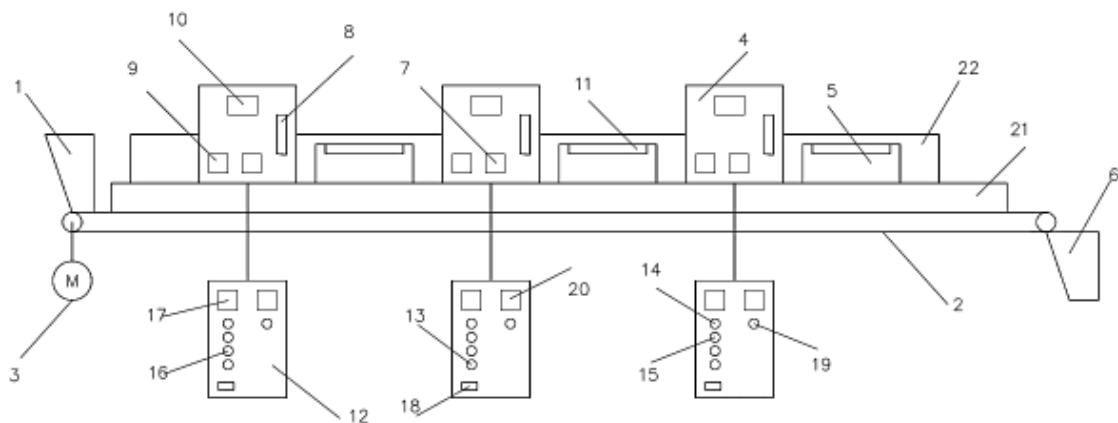


Рис. 1. Схема СВЧ и ИК экспериментальной сушилки

Для моделирования сложной микроволновой ленточной сушилки в электромагнитном поле проведем ее декомпозицию.

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки в электромагнитном поле (рис. 2) состоит из трех микроволновых и трех инфракрасных модулей.

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки

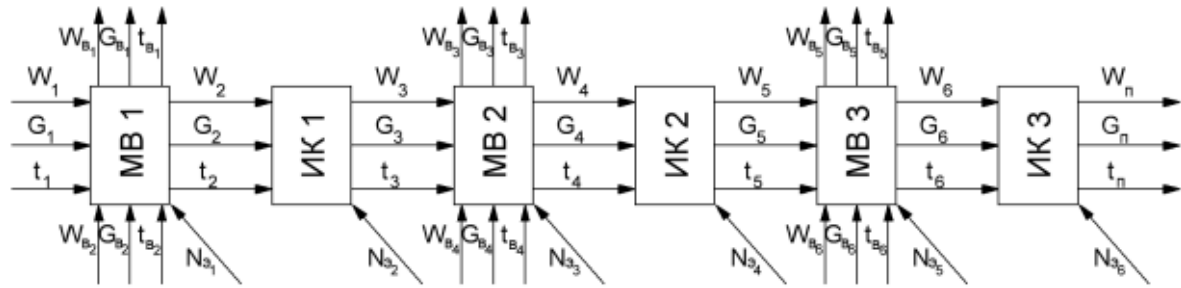


Рис. 2. Аппаратурно-процессовая схема конвейерной сушилки

G_B – расход воздуха, кг/с ; W_B – влажность воздуха, %; t_B – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;
 G_1 – расход сырья, кг/с ; W_1 – влажность сырья, %; t_1 – температура сырья, $^{\circ}\text{C}$;
 G_n – расход продукта, кг/с ; W_n – влажность продукта, %; t_n – температура продукта, $^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим подробнее модули MB1 и ИК1. Продукт проходит через микроволновой модуль MB1 и благодаря электромагнитному излучению N_{s1} происходит процесс дипольного нагрева влаги в начальном объеме продукта G_1 , влага в продукте W_1 испаряется из внутреннего объема продукта стремясь к поверхности, при этом прогревая продукт изменяя его начальную температуру t_1 . Система вентилирования MB1 модуля создает поток воздуха G_{B1} который удаляет испаренную влагу с поверхности продукта изменяя начальную влажность воздуха W_{B1} , при этом, так же, прогревая его температуру t_{B1} .

Далее продукт проходит к модулю инфракрасного облучения ИК1, где благодаря подводу электромагнитной энергии N_{s2} происходит процесс удаления влаги W_2 с поверхности объема продукта G_2 , при этом изменяя температуру продукта t_2 .

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки позволяет перейти к более детальному рассмотрению модели протекающего процесса и параметров, влияющих на него, что позволяет перейти к параметрической модели процесса сушки в электромагнитном поле.

Параметрическая модель ленточной сушилки в электромагнитном поле (рис. 3) включает в себя параметры сырья, технические параметры установки и режимные параметры подвода электромагнитной энергии, которые влияют на показатели удельных затрат энергии на килограмм удаленной влаги – j , Дж/кг.уд.вл. и конечную влажность материала – W_k , %.

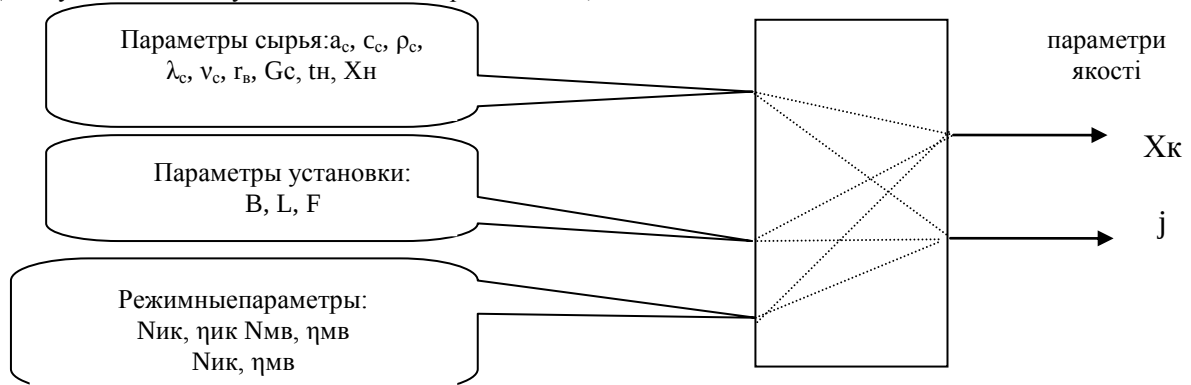


Рис. 3. Параметрическая модель конвейерной сушилки

$N_э$ – электрическая энергия, Вт ; F – площадь поверхности, м^2 ; δ – толщина слоя, м

u_B – скорость воздуха, м/с ; u_L – скорость ленты, м/с

j – удельные затраты на килограмм удаленной влаги, Дж/кг

После рассмотрения аппаратно-процессовой и параметрической схем необходимо составить физическую схему (рис. 4). Поскольку тепловой поток и переносимая им влага распространяются

преимущественно по координате z – математическое моделирование в дальнейшем следует рассматривать как одномерную.

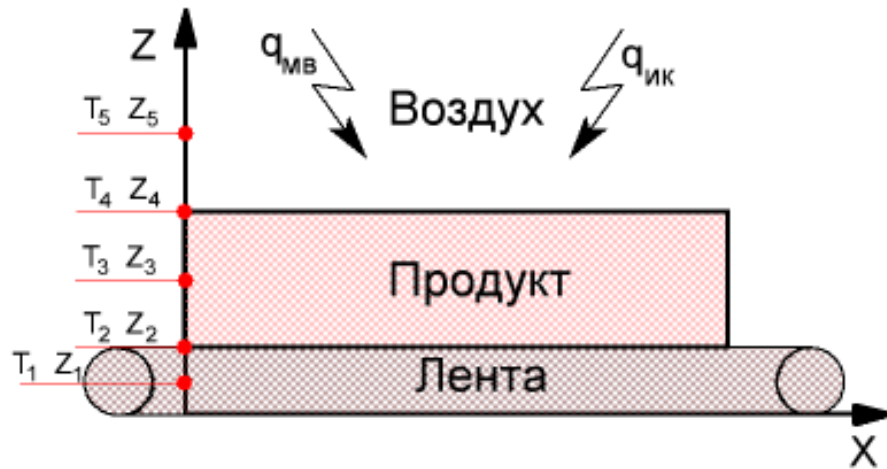


Рис. 4. Физическая схема конвейерной сушилки

Рассмотрим процесс теплообмена относительно одной оси (Z). Следовательно, уравнения, описывающие протекающие процессы, также будут рассмотрены относительно одной оси.

Запишем уравнения, описывающие протекающие процессы.

1) При $Z > Z_4$:

В этой области находится воздушный поток, который взаимодействует с продуктом не как теплоноситель, а как средство переноса испаренной из продукта влаги в окружающую среду.

В математическом моделировании процесса сушки необходимо составить основное в гидродинамических процессах дифференциальное уравнение Навье-Стокса которое, к сожалению, не является решенным по сегодняшний день.

- Уравнение Навье - Стокса:

$$\rho_B * \omega_B * \frac{\partial \omega_B}{\partial z} = \rho_B * g - \frac{\partial P_B}{\partial z} + \mu_B * \frac{\partial^2 \omega_B}{\partial z^2} \quad (1)$$

Так же, одно из основных аэро- и гидродинамических уравнений, выражающее в дифференциальной форме закон сохранения энергии.

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = \alpha_B * \frac{\partial^2 t_B}{\partial z^2} + \frac{qV}{C_v \rho_B} \quad (2)$$

Так как внутренних источников тепловыделения нет, то составляющей $\frac{qV}{C_v \rho_B}$ можно пренебречь:

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = \alpha_B * \frac{\partial^2 t_B}{\partial z^2} \quad (3)$$

Кроме того, в процессе сушки неотъемлемой частью является дифференциальное уравнение сплошности которое отображает закон сохранения массы [4].

- Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_B} * \frac{\partial \rho_B}{\partial t_B} + \frac{\partial \omega_B}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2) При $Z = Z_4$:

Процессы протекающие в этой области заключаются в взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью продукта, и поверхности продукта с воздухом.

- Граничные условия II рода:

В этом случае заданной является величина плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени. В случае с подводом электромагнитной энергии плотность теплового потока в любой момент времени будет неизменной [1].

$$\begin{aligned}q_{ик} &= const \\ q_{мв} &= const\end{aligned}$$

- Граничные условия III рода:

В этом случае задаются температуры среды t_0 и условия теплообмена этой среды с поверхностью продукта [1].

$$\frac{\partial t_{\pi}}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_{\pi}}{\lambda_{\pi}}(t_{ст} - t_0) \quad (5)$$

- 3) При $Z_4 < Z < Z_2$:

В данной области процессы происходят внутри продукта, а именно воздействие электромагнитного поля на биполярные молекулы воды в нем, в следствии чего происходит нагрев воды и последующее удаление ее из центра продукта в его поверхности.

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_{\pi}}{\partial \tau} = \alpha_{\pi} * \frac{\partial^2 t_{\pi}}{\partial z^2} + \frac{q_{икV}}{C_v \rho_{\pi}} + \frac{q_{мвV}}{C_v \rho_{\pi}} \quad (6)$$

- 4) При $Z = Z_2$:

Происходит взаимодействие поверхности продукта с поверхностью ленты в следствии чего происходит теплообмен между продуктом и лентой.

Граничные условия IV рода:

Формулируются на основе равенства тепловых потоков, проходящих через поверхность соприкосновения тел [1].

$$\lambda_{\pi} \frac{\partial t_{\pi}}{\partial n} \Big|_{ст1} = \lambda_{\kappa} \frac{\partial t_{\kappa}}{\partial n} \Big|_{ст2} \quad (7)$$

- 5) При $Z = Z_1$:

Процессы протекают в самой ленте.

- Уравнение Навье - Стокса:

$$\rho_{\kappa} * \omega_{\kappa} * \frac{\partial \omega_{\kappa}}{\partial z} = \rho_{\kappa} * g - \frac{\partial p_{\kappa}}{\partial z} + \mu_{\kappa} * \frac{\partial^2 \omega_{\kappa}}{\partial z^2} \quad (8)$$

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_{\kappa}}{\partial \tau} = \alpha_{\kappa} * \frac{\partial^2 t_{\kappa}}{\partial z^2} \quad (9)$$

- Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_{\kappa}} * \frac{\partial \rho_{\kappa}}{\partial t} + \frac{\partial \omega_{\kappa}}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Так же следует записать уравнения связи описывающие физические свойства элементов

Уравнения связи для каждой среды:

- Теплофизические свойства воздуха при $t = -50 \dots 150^\circ\text{C}$ и $P = 0,101\text{МПа}$: (11)
-

$$\rho_B = 1.292 - 0.452 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0.106 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (12)$$

$$c_B = 1.005 - 0.257 \cdot 10^{-4} \cdot t + 7.14 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad (13)$$

$$\lambda_B \cdot 10^2 = 2.44 + 0.786 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2.54 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (14)$$

$$\nu_B \cdot 10^6 = 13.27 + 8.80 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1.11 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (15)$$

$$\mu_B = \frac{\nu_B \cdot \rho_B}{Pr} = \frac{\mu_B \cdot c_B}{\lambda_B} \quad (16)$$

- Теплофизические свойства яблок при $t = 20^\circ\text{C}$: (17)
-

$$\lambda = 0.49 \dots 0.51 \quad (18)$$

$$\alpha \cdot 10^8 = 14.6 \dots 16.0 \quad (19)$$

Запишем начальные условия при $\tau = 0$: (20)

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_{oc} \quad (21)$$

$$W_{я} = 85\% \quad (22)$$

$$T_{я} = T_{oc}$$

$$q_{ик} = q_{мв} = 0$$

Система уравнений (1-22) с записанными граничными, теплофизическими и начальными условиями является нестационарной одномерной моделью разработанной сушильной установки с электромагнитным подводом энергии.

Проблема практической реализации модели заключается в том, что необходимо решение уравнения Навье-Стокса, в настоящее время возможности решения которого нет.

Принятый путь решения подобной задачи – это привлечение методов теории подобия [3].

Для того, чтобы найти адекватные модели происходящих процессов нужно провести следующий анализ:

- 1) Для каждой зоны, которая анализируется определить сущность физических явлений;
- 2) Установить в каком режиме происходит тепловое воздействие;
- 3) Какое влияние может оказать конструкция разработанной установки.

Теплоотдача при вынужденной конвекции может быть в ламинарном или турбулентном режиме.

Важная задача привести объект к геометрической форме. Корректно слой продукта представить в виде пластины, в которой имеет место нестационарная теплопроводность [2]. Такая задача моделируется с помощью числа Фурье.

На первом этапе рассмотрим моделирование задачи на ленточной сушилке по традиционному конвективному подводу энергии.

С учетом этих положений составлена таблица 1.

Табл. 1. Процессы, протекающие в сушилке и соответствующие им модели в процессе традиционной сушки

Процесс	Режим	Геометрические условия	Модель
Теплоотдача (вынужденная конвекция)	Ламинарный режим	Пластина	$\overline{Nu}_{f,l} = 0.76 \cdot Ra_{f,l}^{0.25} \cdot \varepsilon_t$
Теплоотдача (вынужденная конвекция)	Турбулентный режим	Пластина	$\overline{Nu}_{e,d} = 0.021 \cdot Re_{e,d}^{0.8} \cdot Pr_e^{0.43} \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_t$

Нестационарная теплопроводность	-----	Пластина	$Fo = f(Bi; \theta)$ $\tau = \frac{Fo * l^2}{\alpha_n}$

Модель предлагаемого инновационного варианта ленточной сушилки в электромагнитном поле имеет отличия (таблица 2).

Табл. 2. Процессы, протекающие в сушилке и соответствующие им модели в процессе инновационной сушки в электромагнитном поле.

Процесс	Режим	Геометрические условия	Модель
Теплопроводность	нестационарный	Пластина	$T_k = T_n + \frac{1}{c_n * G_n} * (q_{ик} + q_{мв})$ $\tau = \frac{(T_k - T_n) c_n * m_n}{q_{ик} + q_{мв}}$

После нахождения адекватных моделей происходящих процессов рассмотрим систему расчета времени протекания процесса при инновационной ленточной сушке в электромагнитном поле, теплофизических параметров воздуха, коэффициента теплоотдачи от продукта и время протекания процесса сушки.

Для расчета времени сушки приведена блок-схема (рис. 5). Начальные данные берутся по теплофизическим свойствам продукта, мощности подводимой микроволновой энергии и конструктивным особенностям ленточной сушилки. Далее необходимо определить теплофизические свойства воздуха, рассчитать коэффициент теплоотдачи, число Фурье и скорость движения ленты.

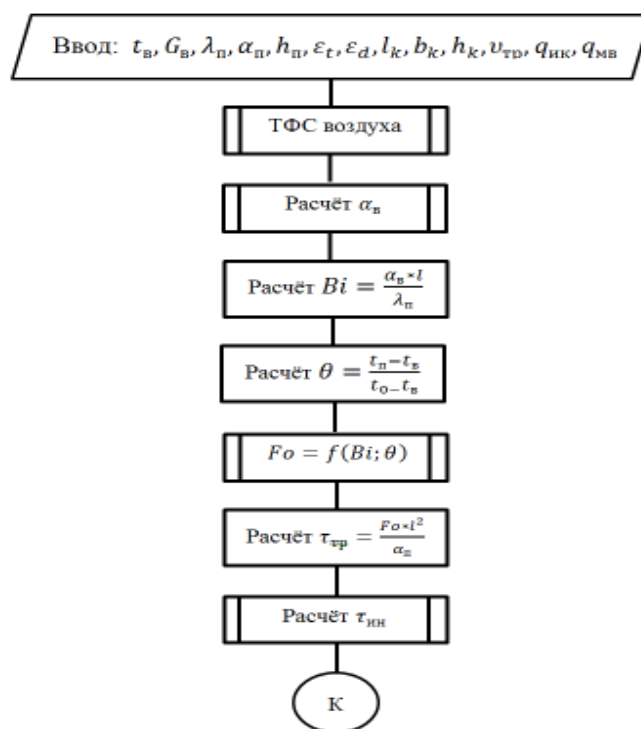


Рис. 5. Блок – схема расчёта модульной микроволновой ленточной сушилки

Для расчета теплофизических свойств воздуха приведена блок-схема (рис. 6), позволяющая нам определить теплоемкость, плотность, теплопроводность, скорость и вязкость воздуха. Следовательно, зная теплофизические свойства воздуха, определяем число Прандтля.

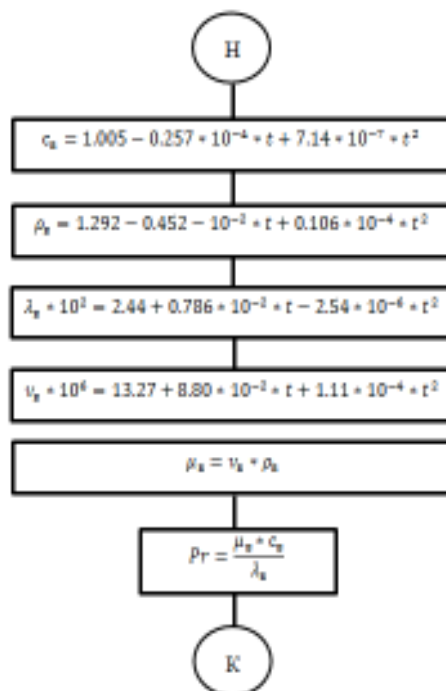


Рис. 6. Блок – схема расчёта ТФС воздуха

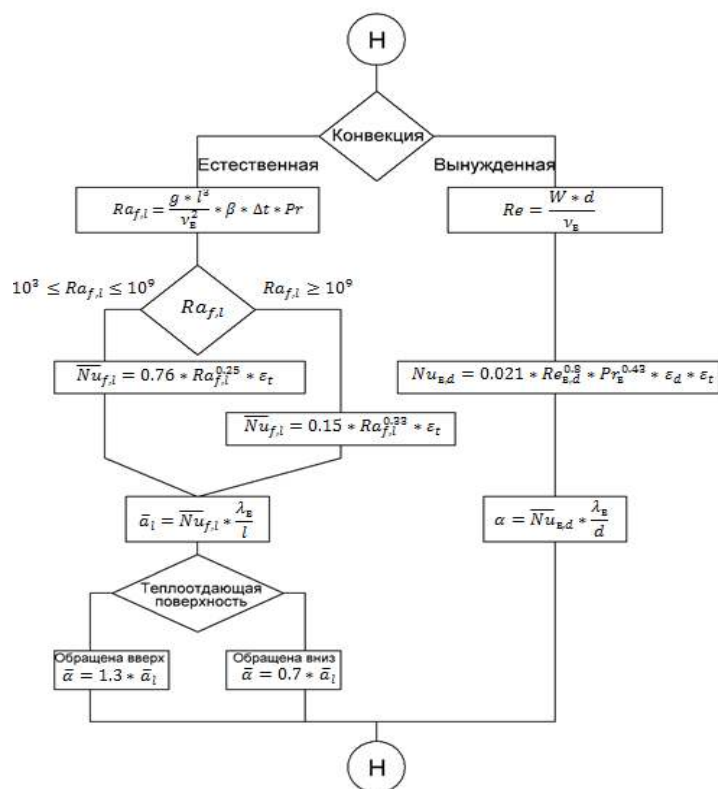


Рис. 7. Блок – схема расчёта коэффициента теплоотдачи к продукту

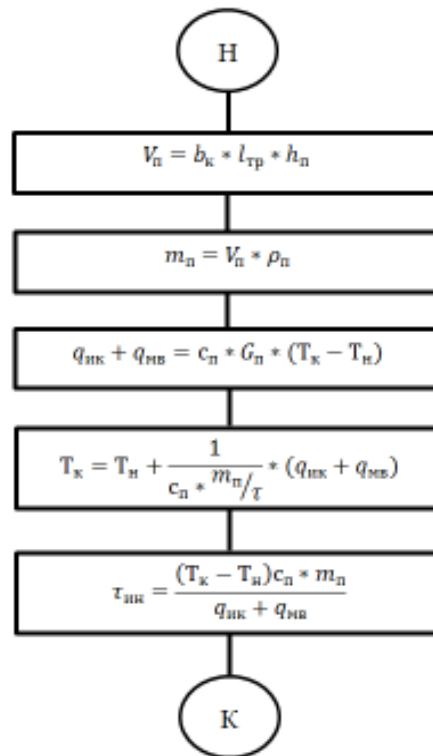


Рис. 9. Блок – схема расчёта времени протекания процесса при не нулевых $q_{нк}$, $q_{мв}$

Следующим шагом будет определение коэффициента теплоотдачи к продукту (рис. 7). В соответствии с числом Рейнольдса выбирается соответствующие критериальные уравнения и определяется число Нуссельта.

Далее необходима диаграмма для определения числа [Фурье](#)

Полученные значения коэффициента теплоотдачи используются для расчета числа Bi . В дальнейшем определяется число Фурье и время процесса.

Расчет времени процесса в инновационной ленточной сушилке в электромагнитном поле проводится в соответствии с блок-схемой (рис. 8).

Исходными параметрами для расчета являются подводимая мощность, скорость ленты, теплофизические свойства продукта и воздуха, расход продукта.

Кинетика процесса сушки в инновационной ленточной электромагнитной сушилке должен быть подтвержден экспериментально.

Вывод:

Инженерный расчет можно проводить по рекомендациям таблицы 2, однако строгий расчет сушки должен проводиться с учетом рекомендаций таблицы 1.

Погрешность, которая возникает при пренебрежении указанных процессов очевидно зависит от сочетания конструктивных параметров и должна быть определена результатом постановки специальных исследований.

Литература

1. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. – Одесса: Друк, 2008. – 348 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967, 400с.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. – М.: Высш. Шк., 1973. – 296 с.

АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬТРАЦІЇ ТА ЗВОРОТНОМУ ОСМОСІ

Гулієнко С.В., к.т.н.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ

ANALYSIS OF PROTECTION OF SUBSTANCE TRANSFER BY MEMBRANE IN NANOFILTRATION AND REFRACTORY OSMOS

Gulienko SV, Ph.D.

National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv

Анотація: Наведено аналіз найбільш поширених моделей концентраційної поляризації та процесу перенесення речовини через мембрану з урахуванням цього явища та відмічено межі їх ефективного використання. Розглянуто опір перенесенню речовини через мембрану та існуючі методи їх визначення. Встановлено перспективні напрямки подальших досліджень в цій галузі.

Abstract: The analysis of most common models of concentration polarization and process of mass transfer through the membrane with taking in to account of this phenomenon are represented and the limits of its using are lined up. The resistance of mass transfer through the membrane and existing methods of its determination are considered. The perspective directions in this field are determinated.

Ключові слова: мембранне розділення; концентраційна поляризація, опір, перенесення маси, осад.

Key words: membrane separation; Concentration polarization, resistance, mass transfer, precipitate.

Вступ. При моделюванні та прогнозуванні роботи баромембранних процесів, в першу чергу зворотного осмосу та нанофільтрації, необхідно враховувати всі ключові фактори, що впливають на процес. При цьому необхідно враховувати, що одним з основних обмежень в роботі мембранного обладнання є явища концентраційної поляризації та утворення неорганічних та органічних осадів на поверхні мембрани [1, 2]. Ці явища не лише погіршують техніко-економічні показники процесів мембранного розділення, але й ускладнюють моделювання процесів. Зокрема, як зазначається в [2], незважаючи на екстенсивні дослідження, фундаментальні механізми та процеси, що включені до утворення шару концентраційної поляризації та осадів на поверхні мембрани повністю залишаються не визначеними.

В останні роки були розвинені методи визначення опору шару осаду [3], тоді як надійних методів визначення опору шару концентраційної поляризації в джерелах не було виявлено. Більшість теоретичних робіт присвячених явищу концентраційної поляризації розглядають закономірності зміни концентрації в та перенесення маси в пограничному шарі [4, 5].

Метою роботи є аналіз опорів перенесення речовини через мембрану в процесах нанофільтрації та зворотного осмосу, а також методів їх визначення, та встановлення ефективності існуючих методів та визначення перспективних напрямків досліджень в цій галузі.

Теоретичний аналіз.

Для аналізу явища концентраційної поляризації було запропоновано ряд моделей [1, 2], найбільш поширеними при розгляді баромембранних процесів є плівкова модель та модель осмотичного тиску.

Згідно плівкової моделі концентрація в пограничному шарі може бути визначена зі співвідношення [1]:

$$\frac{c_m}{c_b} = \frac{\exp\left(\frac{J}{k}\right)}{R + (1 - R) \cdot \exp\left(\frac{J}{k}\right)} \quad (1)$$

де c_m – концентрація розчинених речовин біля поверхні мембрани, кг/м^3 ; c_b – концентрація розчинених речовин ядрі потоку, кг/м^3 ; J – потік речовини через мембрану, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; k – коефіцієнт масовіддачі, м/с ; R – коефіцієнт розділення.

Рівняння (1) дозволяє визначати профіль концентрації в пограничному шарі, однак для цього необхідно знати параметри мембрани (питому проникненість) та масообміну в напірному каналі мембранного модуля (коефіцієнт масовіддачі). Подальший розвиток така модель набула в роботах [4, 5] в тому числі розширенням до розгляду процесу у двовимірному просторі. Однак, плівкова модель не дозволяє прогнозувати потік речовини через мембрану, тому в таких випадках доцільно використати моделі, що враховують опір перенесенню [1, 2]: для ультрафільтрації модель селевого шару, для зворотного осмосу – модель осмотичного тиску. Згідно останньої потік через мембрану може бути представлений [2]:

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu R_T} \quad (2)$$

де Δp – трансмембранний тиск, Па; $\Delta \pi$ – трансмембранна різниця осмотичних тисків, Па; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості розділюваного розчину, $\text{Па} \cdot \text{с}$; R_T – загальний опір перенесенню речовини через мембрану, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Загальний опір перенесенню визначається як сума таких складових [1, 2]:

$$R_T = R_m + R_{cp} + R_c + R_p \quad (3)$$

де R_m – опір мембрани $\text{м}^2/\text{м}^3$; R_{cp} – опір шару концентраційної поляризації $\text{м}^2/\text{м}^3$; R_c – опір шару осаду, $\text{м}^2/\text{м}^3$; R_p – опір заблокованих пор.

Опір мембрани може визначатися властивостями самої мембрани та мембранного матеріалу і, як правило, в ході розділення його зміна нехтовно мала. Його значення може бути визначене експериментально [2] або, залежно від властивостей мембран з використанням рівнянь Хагена-Пуазейля або Козені-Карамана [1].

Опір шару осаду залежить від товщини шару осаду і може бути представлений у вигляді [2]:

$$R_c = \alpha \cdot \delta \quad (4)$$

де δ – товщина шару осаду, м; α – питомий опір осаду, $\text{м}^2/\text{м}^4$.

Для нестисливих осадів, питомий опір може бути визначений на основі рівняння Кармана [2]:

$$\alpha = \frac{180(1 - \varepsilon)}{\rho d_p^2 \varepsilon^2} \quad (5)$$

де ε – пористість шару осаду; ρ – густина шару осаду, кг/м^3 ; d_p – діаметр частинок осаду, м.

У випадку стисливих осадів процес дещо ускладнюється, однак роботі [3] були розглянуті методи врахування цього явища. Зокрема відмічається, що зміна питомого опору шару осаду, може бути врахована, наприклад, за допомогою залежності [3]:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + \frac{\Delta p_c}{p_0} \right) \quad (6)$$

де α_0 – питомий опір шару осаду при стандартному тиску, $\text{м}^2/\text{м}^4$; p_0 – початковий тиск, Па; Δp_0 – перепад тиску через шар осаду, Па.

Крім того, в роботі [3] отримані кореляційні залежності для визначення величин, що входять до складу рівняння (5) як функції потоку речовини через мембрану.

Отже, опір шару мембрани та опір шару осаду може бути відносно легко визначеним за існуючими методами. Враховуючи, блокування пор для процесів нанофільтрації та зворотного осмосу не характерний, тому за умови наявності методик визначення опору шару концентраційної поляризації рівняння (2) стає ефективним та зручним засобом прогнозування потоку речовини через мембрану. Однак надійних залежностей для визначення опору шару концентрації на разі відсутні, крім того,

виникає додаткова складність, пов'язана з тим, що опір шару осаду і опір шару концентраційної поляризації не є незалежними один від одного [3].

В роботі [6] відмічається, що відсутні відомі методи для визначення опору шару концентраційної поляризації, однак відомо, що його величина залежить від кількості відділених частинок в шарі концентраційної поляризації, що в свою чергу є функцією потоку пермеату. Отже опір шару концентраційної поляризації зв'язаний з потоком пермеату. Більш того, в [6] вказується, що на відміну від опору шару концентраційної поляризації, перепад тиску через цей шар визначити відносно просто. Зокрема показано, що перепад тиску через шар концентраційної поляризації (названий критичним тиском) є постійним (названий критичним тиском), коли на поверхні мембрани наявний шар концентраційної поляризації. Критичний тиск не залежить від прикладеного тиску та потоку пермеату і визначається виключно термодинамічними властивостями розділюваної системи. Для монодисперсної системи критичний тиск може бути визначений за рівнянням [6]:

$$\Delta p_c = \frac{3kT}{4\pi a_p^3} N_{Fc} \quad (7)$$

де k – стала Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютна температура, К; a_p – радіус частинки, м; N_{Fc} – критичне число фільтрації, яке визначається залежно від форми частинок та їх концентрації.

В такому разі рівняння (2) може бути модифіковане і потік через мембрану з урахуванням опору концентраційної поляризації може бути представлений у вигляді (без врахування опору заблокованих пор):

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi - \Delta p_c}{\mu(R_m + R_c)} \quad (8)$$

Рівняння (7) виявляється ефективним лише для випадків мікро фільтрації суспензій, оскільки такий процес наближений до традиційної фільтрації, а величина критичного тиску достатньо точно може бути визначена лише для випадку монодисперсних суспензій. В той же час, при нанофільтрації та зворотному осмосі розділяється розчини низькомолекулярних частинок. Крім того, в цьому рівнянні не враховуються гідродинамічні параметри, які визначають інтенсивність масообміну в напірному модулі, що, згідно рівняння (2) визначає профіль концентрації в пограничному шарі. Також не враховується взаємний вплив шару осаду і шару концентраційної поляризації. Тому для розглядуваного випадку така методика є ненадійною.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Модель осмотичного тиску є може бути ефективним засобом прогнозування продуктивності мембранних установок для процесів зворотного осмосу і нанофільтрації, з урахуванням усіх можливих опорів перенесенню речовини через мембрану. Основною складністю використання цієї моделі є відсутність надійних залежностей для розрахунку опору шару концентраційної поляризації. Тому важливим напрямком подальших досліджень є визначення величини цього опору, зокрема з урахуванням параметрів масообміну та гідродинамічних умов в модулі. Зокрема доцільно експериментально перевірити можливість представлення цієї величини для визначення цієї величини методів теорії подібності та аналізу розмірності.

Попередній аналіз дозволяє встановити таке. Концентрація розчинених речовин біля поверхні мембрани, зростання якої обумовлює опір перенесенню, згідно рівняння (2) є функцією від коефіцієнта масовіддачі, який в свою чергу залежить від гідродинамічних умов в модулі. Тому логічним є припущення, що величина опору шару концентраційної поляризації може бути функцією критерію Рейнольда та критерію Шмідта. Крім того, на величину концентрації в пограничному шарі впливає величина потоку, яка може бути врахована за допомогою модифікованого критерію Пекле [7].

Висунуті в результаті переднього аналізу, дозволяють розробити методику експериментальних досліджень та перевірки висунутих гіпотез.

Визначення закономірностей зміни опору шару концентрації в різних умовах проведення процесу та встановлення надійних залежностей для визначення опору шару концентраційної поляризації дозволить більш ефективно використовувати модель осмотичного тиску для прогнозування продуктивності мембранних установок.

Література

1. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.
2. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review // Desalination. – 2010. – Vol. 250. – p. 236-248.
3. Sioutopoulos D., Karabelas A. The effect of permeation flux on specific resistance of polysaccharide fouling layers developing during dead-end ultrafiltration // Journal of Membrane Science. – 2015 – Vol. 473. – P. 292-301.
4. Amokranea M., Sadaoui D., Koutsou C.P., Karabelas A.J., Dudeck M. A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination // Journal of Membrane Science. – 2015 – Vol. 477. – P. 139-150.
5. Nekhamkina O., Sheintuch M. Approximate models of concentration-polarization in Pd-membrane separators. Fast numerical analysis // Journal of Membrane Science. – 2016 – Vol. 500. – P. 136-150.
6. Song L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration mechanism and modeling of membrane fouling // Journal of Membrane Science. – 1998 – Vol. 139. – P. 183-200.
7. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы: теория и расчет. – М. Химия, 1986

УДК 663.938

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА

Левтринська Ю.О., аспірант, Зиков А.В., к.т.н., доцент, Терзієв С.Г., д.т.н., доцент
Одеська національна академія харчових технологій

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF MICROWAVE COUNTER FLOW EXTRACTOR

Levtrinska Yu.O., postgrad. stud., Zykov A.V., Ph.D., assoc. prof.,
Terziev S.G., d.t.sc., assoc. prof.
Odessa National Academy of Food Technologies

Анотація. Проаналізовано проблеми моделювання процесу екстрагування у умовах протитечієного руху екстрагенту і твердої фази в умовах мікрохвильового поля. Обґрунтовано доцільність розрахунку та оптимізації мікрохвильових екстракторів. Визначено основні параметри для розрахунку масопереносу в екстракторі. За допомогою методики аналізу розмірностей 12 шуканих параметрів зведено до 3. Узагальнено результати серії досліджень, проведених з використанням меленої кави. Отримано математичну модель у критеріальному вигляді для мікрохвильового екстрактора. Проведено порівняння чисел Стантона розрахункових та отриманих на основі експериментальних даних. Обґрунтовано вибір параметрів оптимізації. Визначено цільову функцію оптимізації. Розроблено програму оптимізації створену на базі мови програмування Borland Delphi.

Abstract. The problems of modeling the extraction process under the conditions of the countercurrent motion of the extractant and the solid phase in the conditions of the microwave field are analyzed. The expediency of calculation and optimization of microwave extractors is substantiated. The basic parameters for calculation of mass transfer in the extractor are determined. On input – indicators characterizing the extractant (initial and final temperature, viscosity, specific heat, density), solid phase (concentration of extractives, density, porosity and thickness of the layer, equivalent diameter of the particle), apparatus (mass and dimensions, extraction of extractant and product), power supply system (rated power, frequency and number of radiators). At the output – the concentration of the extract and specific power. The parameters for calculating the microwave extractor are determined. Using the method of analysis of the dimensions of 12 required parameters is reduced to 3. The results of a series of studies conducted with ground coffee are summarized. The results are presented in the form of tables and charts. The calculations were carried out with using the theory of similarity and dimensional analysis method. The results of calculations of the concentration differences in the solid phase and in the extract, relative error, mass flow, effective mass transfer coefficient, Reynolds and Stanton numbers, etc. are presented, under the influence of the microwave field. Dependences of the parameters of the coefficient of mass deducing on the power of the microwave field and on the thickness of the product layer. A mathematical model is obtained in a criterion for a microwave extractor. A comparison was made between Stanton numbers calculated and obtained based on experimental data. The choice of optimization parameters has been discussed. The target optimization function has been determined by traditional methods of coordinate descent and Gauss-

Zeidel. An optimization program developed based on Borland Delphi programming language has been developed. The charts for different parameters combination are obtained.

Ключові слова: оптимізація, цільова функція, теорія подібності, мікрохвильовий екстрактор, аналіз розмірностей, масообмін

Keywords: optimization, goal function, similarity theory, microwave extractor, dimensional analysis, mass-transfer

Вступ. Математичне моделювання – необхідний етап при дослідженні будь якого процесу, чи обладнання. Основна проблема при проектуванні екстрактора пов'язана з розрахунком масопереносу в системі «кавова сировина - вода». Для термобаричного екстракційного обладнання, яке використовується на більшості підприємств, методики моделювання процесів уже розроблено, сформовано глибоке розуміння процесу. Однак, для екстрагування з застосуванням мікрохвильових генераторів необхідно виробити такі підходи.

Формулювання проблеми та аналіз літературних джерел. При створенні нових зразків обладнання та проектуванні апаратів необхідно мати чітку математичну модель. Традиційно на підприємствах харчокопцентратної галузі використовується термобаричне екстракційне обладнання, у якому екстракти нагріваються до високих температур при підвищеному тиску. Традиційна технологія використовується на більшості вітчизняних підприємств при екстрагуванні кави [1]. Значним недоліком таких методів є деградація корисних речовин у продукті при впливі високих температур. Розвиток техніки для екстрагування сьогодні відбувається у двох напрямках: удосконалення традиційних і створенні новітніх методів екстрагування. При обранні першого шляху розвитку модернізується традиційне обладнання, для якого оптимізуються конструктивні та режимні характеристики, встановлюються більш досконалі системи регулювання та енергопідведення [2]. Таким чином вдається підвищити ефективність роботи, проте зростання не може бути вищим на порядки. Другий шлях – розробка новітніх технологій. Новий підхід до організації процесу може дозволити підвищити ефективність у рази, дати можливість отримання інноваційних продуктів. Одним із інноваційних напрямів, що інтенсивно набуває розвитку в Україні та у світі – мікрохвильове екстрагування [3-5]. При використанні мікрохвильової енергії можливо впливати безпосередньо на вологу в продукті, що має місце при екстрагуванні у системах розчинник-тверде тіло [3].

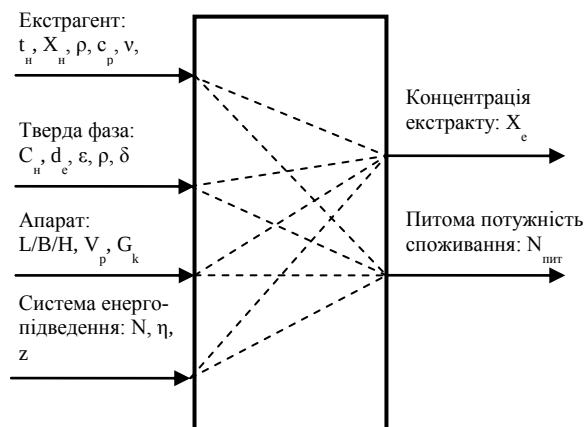


Рис.1. Параметризована модель мікрохвильового екстрактора

Принципово вперше враховуються характеристики системи підведення енергії. Визначальними тут вважаються потужність одного генератора (N), його ККД (η) і кількість випромінювачів (z) (рис. 1). Змінними параметрами в даному випадку приймаються витрата екстрагента, концентрація розчину на виході з апарату, температура процесу, потужність мікрохвильового поля, конструктивні характеристики масообмінних модулів екстрактора.

Для розрахунку гідравлічних і термічних опорів і відповідних коефіцієнтів переносу, можливо, отримати структуру критеріального рівняння використовуючи метод аналізу розмірностей [2]. Для цього необхідно скористатися загальними принципами даного методу моделювання, що дозволить встановити

Головними незалежними вхідними параметрами є: початковий стан екстрагента, твердої фази і продуктивність апарату. Для розрахунку необхідно знати основні параметри мікрохвильового екстрактора (рис. 1), такі як концентрації екстрактивних речовин в твердому тілі (C_n) і екстракті (X_n), температуру екстрагента (t) і тиск в апараті. Важливу роль відіграють властивості екстрагента: щільність (ρ), теплоємність (c_p), в'язкість (ν), питома теплота фазового переходу (γ) і коефіцієнт дифузії (D). Для твердої фази слід враховувати еквівалентний розмір частки (d e), пористість шару (ϵ) і його товщину (δ). Сам апарат характеризується габаритними розмірами, об'ємом реакційної зони (V_p) і масою завантаження твердої фази (G_{sh}).

Загалом, зазначені вище параметри є традиційними для всіх екстракторів [6, 7].

вид критеріального рівняння для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі при комбінованому протіканні процесів екстрагування за схемою, що враховує вплив мікрохвильового поля. У загальному випадку вплив на величину ефективного коефіцієнта масовіддачі β_E мають висоти шару сировини H , густину ρ і в'язкість екстрагенту μ , швидкість його руху w , коефіцієнт дифузії D . Група цих параметрів характеризує інерційні властивості потоку. Гідродинамічна ситуація при формуванні граничного шару на вході в канал виражається співвідношенням висоти шару H і довжини шару L [2]. Внесок природної конвекції встановлюється різницею концентрацій в потоці ΔX і гравітаційним полем. Дія бародифузії [1] за рахунок мікрохвильового поля визначається різницею тисків в зонах каналу.

Величина цієї різниці є пропорційною енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення. Тобто величинам питомої теплоти пароутворення r і потужності поля N .

Тоді вихідна функціональна залежність загального вигляду буде:

$$\beta_E = f(H, L, \rho, \mu, w, D, r, N, k, \Delta X, g).$$

Список перерахованих параметрів представлений в таблиці 1. Всі ці параметри містять тільки три основних розмірності: довжину (L), масу (M) і час (τ)

Таблиця 1. Список параметрів для розрахунку

	Символ	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_E	$m \cdot s^{-1}$
Висота шару	H	m
Довжина шару	L	m
Середня щільність потоку	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
Середня в'язкість потоку	μ	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Середня швидкість потоку	w	$m \cdot s^{-1}$
Коефіцієнт дифузії	D	$m^2 \cdot s^{-1}$
Прихована теплота пароутворення	r	$m^2 \cdot s^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
Проникність шару	k	m^2
Різниця концентрацій	ΔX	$kg \cdot m^{-3}$
Прискорення вільного падіння	g	$m \cdot s^{-2}$

Для рівняння (2) розмірна матриця має вигляд (табл. 2):

Таблиця 2. Розмірна матриця

	a	b	c	g	Рівняння
M		1	1		$b + c = 0$
L	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$
τ			-1	-1	$-c - g = 0$

Користуючись аналізом розмірностей, замінимо цю функцію залежністю між критеріями подібності. В даному випадку число змінних $n = 12$, число їх одиниць вимірювання $m = 3$. Тоді, згідно з π -теоремою, число безрозмірних комплексів, що описують процес, має дорівнювати $(n - m) = 9$.

Параметри H , ρ , μ приймаємо загальними для всіх безрозмірних груп. Тоді, для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = H^a \rho^b \mu^c \beta_E^g \quad (1)$$

Або, в розмірній формі:

$$[m] = [m]^a [kg \cdot m^{-3}]^b [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]^c [m \cdot s^{-1}]^g \quad (2)$$

Результати досліджень. Отримані дані експериментальних залежностей оброблено за допомогою програмного пакету Microsoft Excel з метою оцінки швидкості процесу, визначення значень відповідних коефіцієнтів масовіддачі. Приклад розрахунку коефіцієнта β для умов проведених дослідів представлений в табл.1 і 2. Аналогічні розрахунки були проведені для всіх серій дослідів при інших умовах.

Таблиця 3. Розрахунок параметрів потоку під впливом мікрохвильового поля

C_z , %	$X_{тек}$, %	$J \cdot 10^4$, %/с	$\Delta\tau$, с	$\delta \cdot 10^3$, м	Re
при $N=450$ Вт/кг					
91,13	1,19	73,91	120	4	36,35
92,87	0,74	59,44	120	7	26,82
93,93	1	50,57	120	10	21,22
94,96	0,5	41,93	120	20	19,50

У розрахунках використовувалися такі дані: висота каналу – $8 \cdot 10^{-3}$... $27 \cdot 10^{-3}$ м, ширина каналу $13,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Таблиця 4. Розрахунок параметрів масовіддачі під впливом мікрохвильового поля

ΔC , %	$w \cdot 10^4$, м/с	$V_p \cdot 10^6$, м ³ /с	C_z , %	$\beta \cdot 10^8$, м/с
при $N=450$ Вт/кг				
8,87	13,2	1,17	91,13	5,23
7,13	9,91	0,72	92,87	4,23
6,07	7,54	0,98	93,93	2,41
5,04	5,86	0,49	94,96	2,04

Після обробки результатів отримано значення коефіцієнта масовіддачі (рис. 2 а) від швидкості руху екстрагента всередині екстрактора. При збільшенні шару меленої кави у масо обмінному модулі в 1,75... 4 рази коефіцієнт масовіддачі збільшується в 1,2 ... 2,5 разів відповідно.

Для обробки результатів дослідів використовувалися константи при числі Sc встановлені для класичних задач масообміну, описаних у літературі [3-5], при числах Re , Π та Bu – розрахункові. У такий же спосіб оброблено результати експериментів по визначенню впливу потужності мікрохвильового поля, витрати екстрагенту, товщини шару продукту у масообмінному модулі, що доводить (рис. 2 б), зростання при однакових числах Re і безрозмірній параметричній проникності Π значення коефіцієнта масовіддачі β у 4 рази при збільшенні потужності мікрохвильового поля N в 2 (з 450 до 900 Вт/кг) рази.

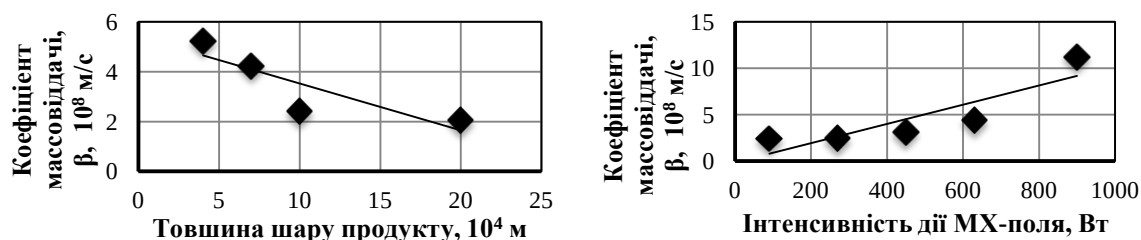


Рис. 2. Залежність коефіцієнта масовіддачі від товщини шару продукту (а) і від потужності (б)

Обробка масиву експериментальних даних дозволяє рекомендувати для розрахунку інтенсивності масопереносу при екстрагуванні з кавової сировини в умовах дії мікрохвильового поля наступне співвідношення:

$$St_m = 0,004 (Re)^{-0,5} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,6} (Bu)^{0,33}. \quad (3)$$

Далі наводиться графік залежності експериментальних $St_{мехр}$ від розрахункових $St_{мтеор}$ даних для безперервного режиму обробки (рис. 3).

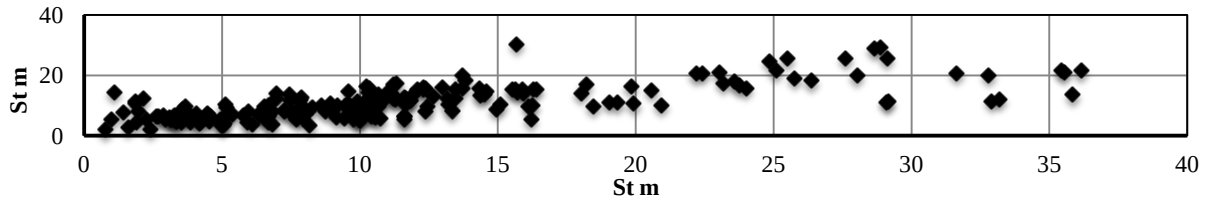


Рис.3. Співвідношення розрахункових і експериментальних даних.

Максимальна відносна похибка розрахунку по співвідношенню (3) складає 38,98 % і спостерігається при великих значеннях числа Стантона.

Завдання оптимізації, як правило, зводяться до відшукування найменшого (або максимального) значення деякої функції, яку прийнято називати цільовою функцією або критерієм якості. З огляду на структуру розробленої математичної моделі екстрактора використаний метод оптимізації параметрів установки, заснований на дослідженні просторів параметрів R_n шляхом рівномірного його заповнення точками x_j , $j = 1, 2, \dots, N$, по всьому простору. У кожній з x_j обчислюється значення цільової функції Z . Отримана інформація використовується в процедурі вдосконалення завдання і оптимізації рішення. Багатовимірні точки $x_j = \{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}$ послідовності знаходяться за співвідношенням:

$$x_{ij} = x_i^H + q_{ij} (x_i^e - x_i^H), \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N,$$

тобто x_i^e , x_i^H – відповідно верхня і нижня межі варіювання i -того параметра; N – число пробних точок рівномірно розподілених послідовності $x_1 \dots x_N$; $0 < q_{ij} < 1$. Далі рекомендується послідовно переходити в околиці точок, де отримані найкращі результати, поступово уточнюючи границю x_i^e , x_i^H . Для звуження простору пошуку слід використовувати додаткову інформацію, отриману шляхом дослідження спрощених залежностей або наближених рішень. У загальному випадку термoeкономічний критерій оптимізації має вигляд:

$$Z_{\Sigma} = \left(\frac{\sum_n U_n P_n + K_n}{\sum_k e_k} \right), \quad (5)$$

де U_n , P_n – вартість і річне споживання ексергії із зовнішніх джерел; K_n – річні капітальні та інші, пов'язані з ними витрати в n -му елементі; e_k – річна витрата ексергії для отримання k -го продукту. Таким чином, завдання оптимізації в загальному випадку може бути зведена до пошуку екстремуму функції.

$$Z_{opt} = \min Z_{\Sigma} \quad (6)$$

Очевидно, більш наочно з економічної точки зору використовувати річне споживання електроенергії і вартість продукції в критерії (5). Так само має сенс врахувати капітальні витрати на виготовлення установки, тоді критерій може прийняти вигляд:

$$Z = \min \left(\frac{\sum (U \cdot P) + K + \sum (C_e \cdot P_e)}{B} \right), \quad (7)$$

де U , P – вартість і річне споживання сировини; K – річні капітальні та інші, пов'язані з ними витрати; C_e , P_e – вартість і річне споживання енергії для отримання готового продукту.

Для спрощення завдання можна буде враховувати в критерії тільки змінну складову, тоді:

$$Z = \max (U \cdot D - K_y - C_{ey} \cdot P_{ey}), \quad (8)$$

де P_{ey} – щорічне споживання енергії установкою, кВт·год; C_{ey} – вартість одиниці енергії, грн / кВт·год; K_y – вартість установки, грн; D – кількість сировини, зекономленого за рахунок додаткового вилучення з кавової сировини, яка розраховується за формулою:

$$D = G_{ocm} \cdot (C_n - C_{ocm}) \cdot k_{36}, \quad (9)$$

де k_{36} – коефіцієнт, що враховує втрати екстрактивних речовин зі шламом по відношенню до вихідної сировини (сирим зернам кави) і дорівнює 1,3.

Або:

$$Z = \min (C \cdot O + K_y + C_{3y} \cdot P_{3y}), \quad (10)$$

де O – вартість сировини, витраченого на компенсацію втрат продукту з шламом:

$$O = C_{ост} \cdot G_{ост} \cdot k_{38}, \quad (11)$$

де $G_{ост}$ – маса кавового шламу, кг; C_n – концентрація екстрактивних речовин в кавовій сировині на вхіді в установку, %; $C_{ост}$ – залишкова концентрація екстрактивних речовин в шламі, %.

Після аналізу запропонованих критеріїв (7), (10), для вирішення поставлених завдань оптимізації МХ-екстрактора прийнято критерій (10), який відображає ефективність ступеня додаткового вилучення екстрактивних речовин з кавової сировини. Оптимізація установки – це пошук максимального значення цільової функції Z .

Застосування відомих математичних методів для оптимізації МХ-екстрактора ускладнюється характером математичних моделей установки, складною структурою масових і теплових потоків. У зв'язку з цим доцільно проводити оптимізацію і аналізувати вплив конструктивних та режимних параметрів проєктованого екстрактора на техніко-економічні показники установки з використанням засобів обчислювальної техніки.

Реалізація алгоритму покоординатного спуску здійснюється по кожній координаті локального оптимуму. В результаті визначаються поля концентрацій в екстракторі. Для аналізу впливу конструктивних параметрів: довжини масообмінного модуля L , ширини масообмінного модуля B , висоти масообмінного модуля h і кількості масообмінних модулів n на техніко-економічні показники проводився комп'ютерний експеримент. Для вирішення завдання оптимізації обраний математичний метод, який перш за все приводив би до кінцевих результатів з найменшими витратами на обчислення. Вибір методу покоординатного спуску або метод Гаусса-Зейделя в значній мірі визначався постановкою завдання, а також математичною моделлю об'єкта оптимізації. Даний метод є класичним ітераційним методом. Відзначимо, що цей метод зводить задачу пошуку найбільшого значення функції кількох змінних до багаторазового вирішення одновимірних задач оптимізації.

Знаходження рішення при використанні принципу максимуму зводилося до задачі рівномірного заповнення досліджуваної області обчисленими значеннями цільової функції (10). На область зміни змінних були накладені обмеження. Для виконання поставленого завдання застосовували програму «EXTRACTOR.2», написану на мові програмування Pascal, в середовищі Borland Delphi 7.0, наведену на рис. 4.

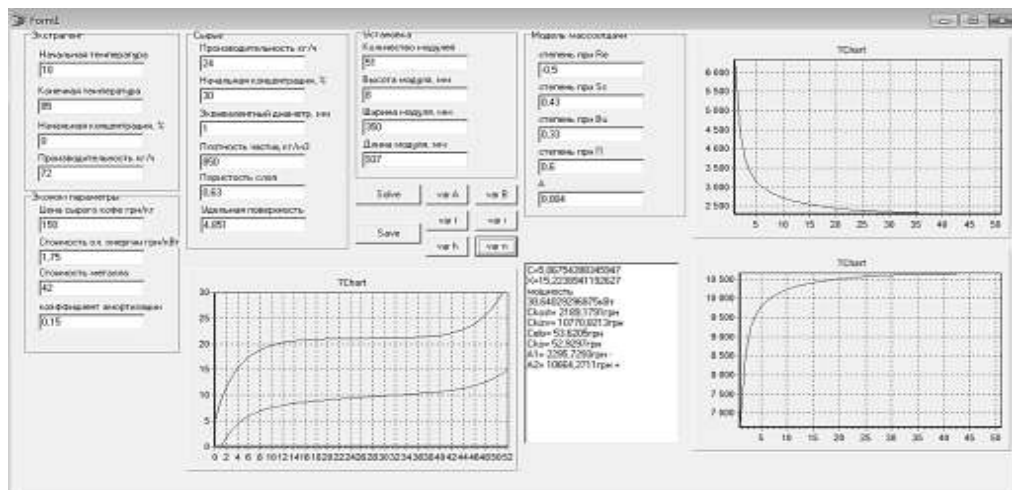


Рис. 5. Скріншот головного вікна програми «EXTRACTOR.2»

Програма дозволяє варіювати параметри оптимізації в заданих діапазонах, розраховувати значення цільової функції і будувати графіки її залежності від обраного параметра при фіксованих значеннях інших параметрів. При цьому визначалося значення параметра, відповідне максимуму цільової функції,

яке фіксувалося; далі переходили до варіювання наступного параметра. Після знаходження локального оптимуму за останнім параметром знову проводиться перехід до першого. Процедура оптимізації рішення триває до моменту, поки розбіжності між критеріями оптимізації в попередньому і наступному етапі не стане менше наперед заданої похибки.

На рис.6 представлено залежності, отримані для кавової сировини з почтаковою концентрацією 30 % екстрактивних речовин.

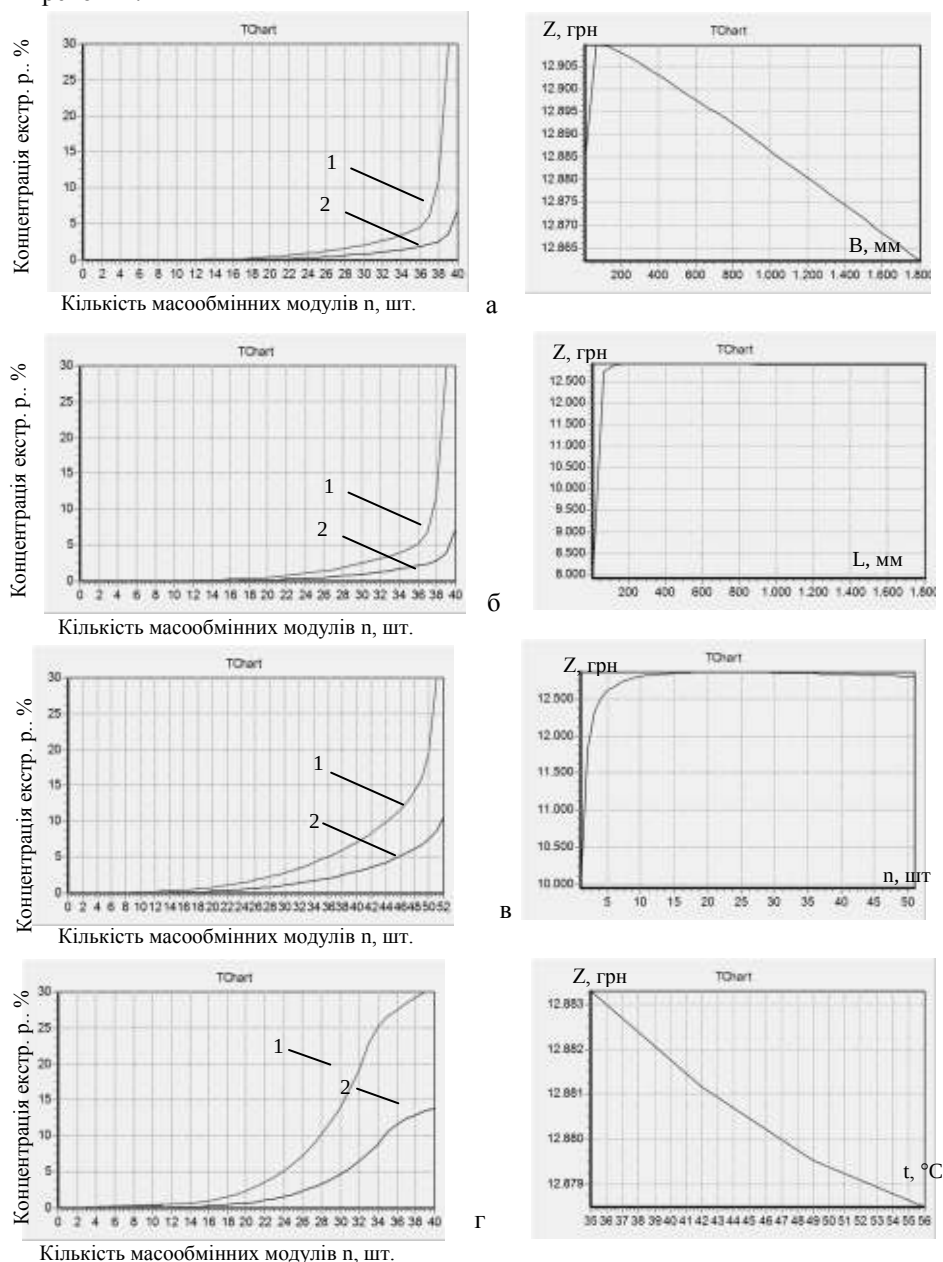


Рис. 6. Розподіл концентрації екстрактивних речовин в рідкій і твердій фазі за модулями, відповідно до локального максимуму Z в залежності від а) ширини модуля, б) довжини модуля, в) кількості модулів, г) кінцевої температури.

З отриманих залежностей можна зробити висновки, що функціонал економічної ефективності Z найбільший при ширині модулів 150...180 мм, довжині 200...900 мм, кількості модулів 20...30 шт, та тим більший, чим нижча температура екстракту на виході.

Висновки. Використання мікрохвильової техніки для екстрагування має значні резерви для підвищення ефективності здійснення процесу. Розроблені методики математичного моделювання та

оптимізації дозволяють обрати оптимальні конструктивні показники, та зробити прогнозування щодо економічної ефективності таких апаратів. Розроблена програма «EXTRACTOR.2» дозволяє оптимізувати конструктивні та технологічні параметри для мікрохвильового екстрактора, отримати чіткі залежності функціоналу економічної ефективності в залежності від різноманітних факторів в окремоті та у комплексі.

Література

1. Бурдо О.Г., Пищевые нанозерготехнологии – Херсон, 2013 – 294 с.
2. Процессы переработки кофейного шлама [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская– Киев: «ЭнтерПринт», 2014 – 228 с.
3. Chan C.-Hung A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants [Text] / C.-Hung Chan, J.-J. Lima, R. Yusoff, G.-C. Ngoh // Water Environment Research, – 2015 - Vol. 88, Num. 10 P.1192-1229
4. Microwave-assisted extraction of Eucalyptus robusta leaf for the optimal yield of total phenolic compounds [Text] / D.J. Bhuyan, Q.V. Vuong, A.C. Chalmers, I.A. van Altena, M.C. Bowyer, C.J. Scarlett// Industrial Crops and Products – Vol. 69 – 2015 – P.1–10
5. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from Myrtus communis L. leaves [Text] / F. Dahmoune, B. Nayak, K. Moussi, H. Remini, K. Madani // Food Chemistry – Vol. 166 (2015) – P. 585–595
6. Аксельруд, Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость [Текст]/ Г.А. Аксельруд.- Л.:Химия, 1974.- 256 с.
7. Потапов, В.О. Моделювання процесів та обладнання харчових виробництв /А.М. Поперечний, В.О. Потапов, В.Г. Корнійчук.- К.: Центр учбової л-ри.– 2012.- С. 135-139.

УДК 536.423.4

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ

Когут В.Е., Бушманов В., Хмельнюк М.Г.

Расчет процессов испарения взвешенной жидкости в слабо исследованных областях применения есть перспективное и актуальное направление исследования. Кроме того, уточнение некоторых расчетов в фильтре эжекторе должно способствовать решению некоторых экономических проблем, которые стали явными в последнее время.

Проблема выноса канцерогенных смол вместе с дымовыми газами, в окружающую среду является не только экологической, но и экономической. Изначально при работе системы некоторые фильтры способны задерживать эти смолы. Но налипшие частицы могут ухудшать работоспособность фильтров. Например, уменьшать проходимость сеточного фильтра, что ведет к увеличению местного сопротивления, и соответственно к увеличению затрат на прокачку. Смолы так же могут уменьшать проводимость электрических фильтров, что негативно сказывается на их работоспособности.

Использование фильтра эжектора потенциально способно решить эти проблемы. В этом фильтре за счет объемного теплообмена от газового потока отделяется сравнительно легко конденсируемые смолы. Однако методика расчета требует некоторых уточнений. Одним из факторов, влияющих на интенсивность теплообмена является площадь теплообменной поверхности. Поверхностью теплообмена в данном случае является площадь капли. Но при этом мелкие капли имеющие меньшую площадь испаряются быстрее за счет малого объема и малой толщины сферического слоя.

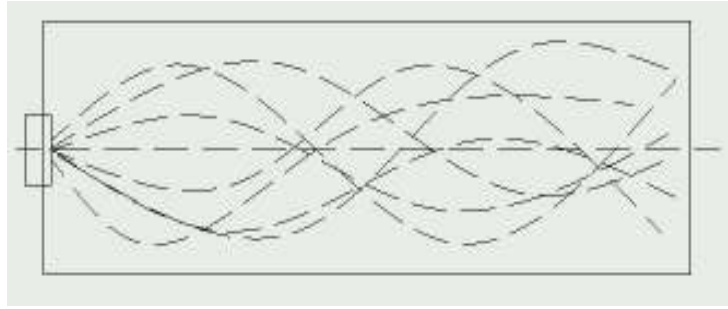


Рис.1 Траектория движения частиц в турбулентном потоке.

На рис 1 изображена примерная схема уноса капелек жидкости в потоке. При движении капли испытывают значительное сопротивление и перегрузки. В капле противостоят силы сопротивления, вызываемые встречным потоком стремящиеся деформировать каплю и силы поверхностного натяжения, стремящиеся стабилизировать каплю.

Для уточнения расчетов можно сделать ряд допущений, согласно которым капля в зависимости от скорости ее движения в потоке будет распадаться на более мелкие капли или деформироваться. Известно, что при некоторых скоростях капля может принимать разнообразные формы, от линз до тонких пленок. Внесение подобной поправки на изменение площади теплообмена должно увеличить точность расчетов. На рис 2 показано отношение диаметра капли к ее скорости. Где линия 1 означает деформацию и распад капель, линия 2 распыление капель.

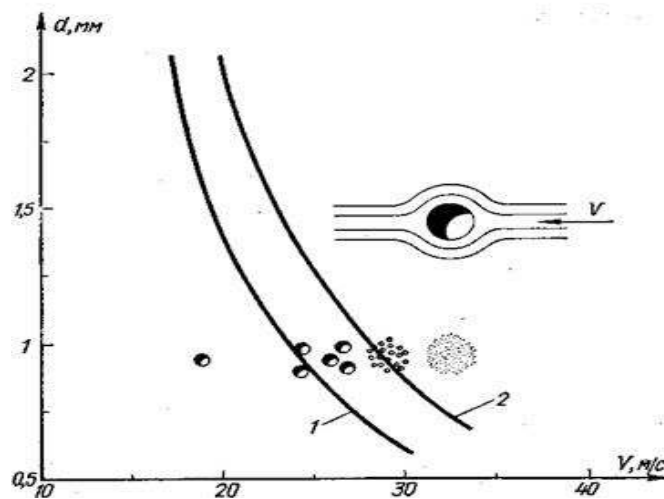


Рис.2 График распада капель

Фукс в своей книге о испарении капель указывает что уточнение формы испаряющийся капли дает прирост точности расчетов в примерно 4 % (за счет учета увеличения площади поверхности капли), что является не настолько большим приростом ради которого есть смысл проводить их. Однако данные приведенные Фуксом применимы для случая испарения одиночной капли.

Учет суммарного изменения площади теплообменной поверхности в облаке капель может дать значительный рост точности расчетов.

Вывод. При расчетах испарительных процессов увеличение точности расчетов связанных с точным учетом площади поверхности, может оказать влияние на точность расчетов. Учет становится возможен если учитывать деформации капель при их движении через слои газа. Существуют экспериментальные данные по которым установлена зависимость скорости потока и формы капли. Критерий привязан к плотности газовой среды и поверхностным натяжением жидкости, этот критерий называется критерием вебера.

ЗМІСТ

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ КОНДЕНСАТУ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З ЗАСТОСУВАННЯМ СПОСОБУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ	
Долінський А.А., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Коник А.В., Радченко Н.Л., Гартвіг А.П.	4
ЕКОНОМІЯ ВОДИ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ	
Ткаченко С. Й., Іщенко К. О.	9
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНИТОРИНГ ОЛІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА	
Бурдо О.Г., Бандура В.М., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О.	13
ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ СОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІДКРИТОГО ТИПУ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В СИСТЕМАХ	
Беляновська О.А., Сухий К.М., Коломієць О.В., Сухий М.П.	23
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО ТОПЛИВА ИЗ УГЛЯ ПАРОПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ	
Холявченко Л.Т., Опарин С.А., Давыдов С.Л.	28
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОТОПЛЕНИЯ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ	
Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Давыдов В.А.	32
ДИНАМІКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОГО МІСКАНТУСА	
Атаманиук В.М., проф., Мосюк М.І., Гнатів З.Я.	37
ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГОТЕЛЬНО РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ	
І.М.Ощипок	41
ВИЛУЧЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОТИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРМОСИФОНІВ	
Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Величко В.В.	47
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН ДЛЯ ТЕПЛОНАСОСНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УКРАИНЕ	
Уланов Н.М., Уланов М.Н., Чалаєв Д.М.	51
ВПЛИВ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ	
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.	57
ЕНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЙ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ	
Бурдо О.Г., Давар Ростами Пур	62
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОНАДХОДЖЕННЯ ГЕЛОПАНЕЛІ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	
Козін В. М., Винниченко Б. О.	67
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМ ПІДПРИЄМСТВОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	
Книш О.І., Беспалова А.В., Дашковська О.П., Файзуліна О.А.	72
АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ	
Янаков В.П.	79
ЕНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА КОНЦЕНТРИРОВАННОГО ГРАНАТОВОГО СОКА	
Давар Ростами Пур, Войтенко А.К., Светличный П.И., Мордынский В.П.	84
ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Керш В.Я., Колесников А.В., Гедулян С.И., Твердохлеб С.А.	91
ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕПЛОВА МОДЕРНІЗАЦІЯ ГІМНАЗІЇ №5, М. ОДЕСА	
Безбах І. В., Чабанюк В.Р., Воронко О. Ю., Супрунець Є. М.	93
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АГРОПЕЛЕТ	
Хоренжий Н.В., Лапінська А.П., Перетяка С.М., Дєтков Г.Г.	96

КИНЕТИКА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ГРАНАТОВОГО СОКА В УСТАНОВКЕ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ	101
Стоянова А.М., Драгни Е.И., Терземан Е.Ф.	
РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ С УТИЛИТНЫМИ ПУТЯМИ	
Ульев Л.М., Маатук А.	106
ПРОЕКТ ТЕРМОМОДЕРНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО КОРПУСА ОНАПТ	
Перетяка С. Н., Козинец А. Ю., Бандура Д. А.	111
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОНАСОСНОГО СУШІННЯ	
Дабіжа Н.О.	115
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ	
Чаласєв Д.М., Шматок О.І., Грабова Т.Л., Сильнягіна Н.Б.	121

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ ТА ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

ПОГЛИНАННЯ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ ІЗ СУМІШІ ПОВІТРЯ З ДІОКСИДОМ СУЛЬФУРУ	
Дячок В. В., Гуглич С. І., Катишева В. В., Мандрик С. Т.	126
ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА МОНТМОРИЛОНІТУ, МОДИФІКОВАНОГО ПОЛІОНЕНАМИ	
Суша І.В., Томіло В.І., Белянєвська О.А., Сухий К.М.	131
ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА З РІДКИМ РЕАГЕНТОМ	
Гумницький Я.М., Атаманюк В.М., Симаєв Д.М., Данилюк О.М.	138
АДСОРБЦІЙНО-ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ У СТАТИЧНОМУ ШАРІ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ В СТАЦІОНАРНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	143
ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА НЕЕНЕРГОСМНИХ КОНЦЕНТРАТІВ ФІТОПРЕПАРАТІВ	
Бурдо А.К., Альхурі Юсеф, Ананійчук Е.Ю., Велічко В.П.	148
РОЛЬ НАДЛІШКОВОГО МАРГАНЦЮ В ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ МАНГАНІТУ І СТАБІЛІЗОВАНОГО ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ	
Акимов Г.Я., Новохацька А.О.	153
ЗАХИСНІ ПОЛІЕТИЛЕНОВІ ТРУБИ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З АНТИФРИКЦІЙНИМ ВНУТРІШНІМ ШАРОМ	
Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г.	157
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ	
Рябик П.В., Опарин С.А., Гриднева Т.В.	161
ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКСТРУДИРОВАННОГО ЯДРА ПОДСОЛНЕЧНИКА	
Евлаш В.В., Потапов В.А. Никитин С.В.	164
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	
Тришин Ф.А., Трач А.Р., Орловская Ю. В.	168
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ МОРСКОЙ ВОДЫ В АППАРАТАХ БЛОЧНОГО ВЫМОРАЖИВАНИЯ	
Тришин Ф.А., Масельская Я.А.	174
ОЦІНЮВАННЯ БЕЗРЕАГЕНТНОЇ ОБРОБКИ ВОДИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	
Журавська Н. Е.	179

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

СПОСОБИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВОЛОГОВИДАЛЕННЯ ПРИ ЗНЕВОДНЕННІ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ	
Снежкін Ю.Ф., Гусарова О.В., Шапар Р.О.	182
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ФИТОЭСТРОГЕННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОРОШКОВ	
Петрова Ж. А., Слободянюк Е. С.	186
СВЯЗЫВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПРЕБИОТИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ	
Петрова Ж. О.	192
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТІВ	
Гоженко Л. П., Коник А. В., Радченко Н. Л., Целень Б. Я., Недбайло А. Є.	195
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА МИКРОВОЛНОВОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ЭКСТРАКТОРА КОФЕ	
Левтринська Ю.О., Терзиев С.Г.	200
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТИВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ	
Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А.	209
ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРАЦІЙНО-ОКИСНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ РОТОРНОГО ТИПУ НА ПРОЦЕС ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ	
Ободович О.М., Сидоренко В. В.	211
ВИКОРИСТАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО БЛАНШУВАННЯ СИРОВИНИ В ПРОЦЕСІ ЕКСТРАГУВАННЯ	
Чорний В. М., Прищепя Ю. Ю., Лапіна Н. В., Мисюра Т. Г., Попова Н. В.	215
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСТОЮВАННЯ ПЛОДІВ КИЗИЛУ	
Степанчук М.С., Лапіна Н.В., Чорний В.М., Мисюра Т.Г., Попова Н.В.	219
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСТОЮВАННЯ ПЛОДІВ ЖУРАВЛИНИ	
Бараловська О. В., Прищепя Ю. Ю., Чорний В. М., Мисюра Т. Г., Попова Н. В.	223
КІНЕТИКА СУШІННЯ НАСІННЯ СОНЯШНИКУ ТА СОЇ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ	
Бандура В.М., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О., Катасонов О. В.	226
СУШАРКИ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ	
Яровий І.І., Катасонов О.В.	232
ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ПИЩЕВЫХ РАСТВОРОВ	
Зыков А.В., Резниченко Д.Н., Безбах И.В.	242
БАЛАНСОВІ, ЕНЕРГЕТИЧНІ, КІНЕТИЧНІ ТА ФАЗОВІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИМОРОЖУВАННЯ СОКІВ	
Бурдо О.Г., Мординський В.П., Давар Ростами Пур	244
СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКТИВНОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНВЕСЕРНИХ ВІБРАЦІЙНИХ СУШАРОК ПРИ ОБРОБЦІ СИПКОЇ СИРОВИНИ	
Паламарчук І. П.	250
МАСООБМІН ПРИ ЕКСТРАГУВАННІ КАВІ АКТИВОВАНИМ ЕКСТРАГЕНТОМ	
Вітенько Т.М., Городиський Н.І.	254
БАЛАНСОВІ МОДЕЛІ ТА ФАЗОВІ РІВНОВАГИ ПРИ КРІОКОНЦЕНТРУВАННІ ГРАНАТОВОГО СОКУ	
Бурдо А.К., Давар Ростами Пур, Стоянова О. М., Драгні О. І.	260
МАШИНА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАННЯ ПЕРА ПТИЦЬ	
Всеволодов А.Н., Романов С.О.	266
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ВАКУУМНАЯ СУШИЛКА	
Бурдо О. Г., Мордынский В. П., Светличный П. И., Ананийчук Э. Ю.	270
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ОДИНИЧНИХ КРАПЕЛЬ КРОХМАЛЬНОЇ ПАТОКИ ИГ-30 ЯК ОБ'ЄКТУ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ	
Шаркова Н. О., Турчина Т. Я., Жукотський Е. К., Декуша Г. В., Костянець Л. О.	275
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ	279

Безбах И. В., Кепин Н. И.	
ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ	
Недбайло А. Є.	285
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ	
Тришин Ф. А., Терзиев С. Г., Орловская Ю. В.	289

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНО – ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ	
Малежик І. Ф., Бурлака Т. В., Дубковецький І. В., Деканський В. Є.	296
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ	
Мистюра Т. Г., Зав'ялов В. Л., Лобок О. П., Попова Н. В., Запорожець Ю. В.	302
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ	
Бухкало С. І.	309
ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП'ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ	
Яровий І. І.	313
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕССАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ	
Иваницкий Г. К.	319
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАКУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ	
Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Резниченко Т. А., Резниченко Д. Н.	322
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН – КАУЧУК	
Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г.	327
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур	335
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ	
Остапенко О. П.	331
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ	
Снежкин Ю. Ф., Коринчук Д. Н.	337
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА	
Тришин Ф. А., Трач А. Р.	343
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур, Масельская Я. А.	347
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ	
Бурдо О. Г., Маренченко Е. И., Пилипенко Е. А., Балагура В. В.	355
АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬРАЦІЇ ТА ЗВОРОТНОМУ ОСМОСІ	
Гуліснюк С. В.	364
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА З ПІДВОДОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ	
Левтринська Ю. О., Зиков А. В., Терзиев С. Г.	367
К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ	
Когут В. Е., Бушманов В., Хмельнюк М. Г.	374