

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗИКОВ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ



УДК 664.046.021.4:620.97:536.7

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ НА  
ОСНОВІ СИСТЕМ ТЕРМОТРАНСФОРМАЦІЇ, ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ТА  
ПРИНЦИПІВ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних  
виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Одеса - 2018

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант**

– доктор технічних наук, професор,  
лауреат державної премії  
**БУРДО Олег Григорович**,  
Одеська національна академія харчових технологій,  
кафедра процесів, обладнання та енергетичного менеджменту, завідувач кафедри.

**Офіційні опоненти:**

– доктор технічних наук, професор,  
**Потапов Володимир Олексійович**,  
Харківський державний університет харчування та торгівлі, кафедра холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки, завідувач кафедри;

– доктор технічних наук, професор,  
**Паламарчук Ігор Павлович**,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра процесів і обладнання переробки продукції АПК, професор кафедри;

– доктор технічних наук, професор,  
**Дячок Василь Володимирович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра прикладної екології та збалансованого природокористування, професор кафедри.

Захист відбудеться **11 грудня 2018 року об 11<sup>00</sup> годині** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01. Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039 м. Одеса, вул. Канатна, 112, ауд. А-234.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039 м. Одеса, вул. Канатна, 112.

Автореферат розіслано **9 листопада 2018 року**.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
канд. техн. наук, доцент



Т. І. Нікітчина

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасних умовах постійно зростаючої вартості енергії, все більш гострою стає проблема раціонального використання утилізації і рекуперації теплоти у всіх процесах харчових технологій. Сучасні теплотехнології АПК ґрунтовані, як правило на використанні проміжного теплоносія для обробки сировини. Засобами інтенсифікації процесів тепло масообміну є підвищення швидкості руху теплоносія, тобто його витрат. Але це пов'язано з підвищенням витрат енергії з відпрацьованим теплоносієм. Виникло протиріччя між новими вимогами енергоефективності та традиційними засобами удосконалення техніки.

Вагомий внесок в удосконалення існуючих теплотехнологій харчових виробництв зробили вітчизняні та закордонні вчені: Долинский А.А., Басок Б. И., Снежкін Ю.Ф., Потапов В.О., Погожих М.І., Письменный Е.Н., Дячок В.В., Паламарчук І.П., А. S. Mujumdar, S. Devahastin, T. Kudra, Bejan A., Fu Y.-J., Г.Ф. Смирнов, Бурдо О.Г. Завдяки їх дослідженням були удосконалені традиційні процеси сушіння, екстрагування, концентрування та інші. Однак зростаюча вартість енергоносіїв вимагає подальшого пошуку нових більш ефективних енерготехнологій.

Багато років на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту (ПОЕМ) Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) проводяться дослідження присвячені ефективному використанню енергії. Теоретичними та експериментальними дослідженнями показано високу ефективність використання автономних двофазних випарювально-конденсаційних модулів для утилізації теплоти теплових викидів. Використання високоефективних методів підведення теплоносія за допомогою теплових труб і термосифонів дозволяє довести технологічні установки до високої енергетичної досконалості використання, утилізації і рекуперації теплоти, значно знизити витрати енергії. Також розроблені схеми використання двофазних випарювально-конденсаційних модулів для сушіння і охолодження сипучих продуктів, за допомогою яких теплота ефективно підводиться до продукту і відводиться від нього. Так, блочна зерносушарка, що розроблена на кафедрі реалізує принцип підводу частки енергії безпосередньо до продукту, що висушується, а також глибокої рециркуляції енергоносія. Запропоновані системи охолодження сипучих продуктів забезпечують відведення теплоти саме з тих місць де є перегрів, тобто із середини шару продукту. Накоплений багаторічний досвід з удосконалення процесів екстрагування також підтверджує ефективність підводу енергії напряду до продукту. Таким чином, адресне підведення енергії туди де вона потрібна дозволяє значно підвищити енергоефективність процесів за рахунок відсутності витрат енергії з проміжним теплоносієм, зменшення перегрівання або переохолодження зовнішніх шарів продукту і, відповідно витрат енергії на цей процес.

Але у багатьох випадках технологічна схема дозволяє реалізувати багато варіантів направлення потоків енергії. Вирішення завдань енергоефективності при конкретному способі енергопідводу вимагає індивідуального підходу з врахуванням специфіки кожного виду продукту.

Вважається доцільним провести узагальнення методів підвищення енергоефективності виробничих процесів з використанням систем термотрансформації, теплоутилізації і принципів адресного підводу енергії, розробити загальні методики проектування і оптимізації обладнання, що реалізує ці методи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на протязі 2005 – 2017 років на кафедрі ПОЕМ ОНАХТ відповідно до держбюджетної тематики науково-дослідних робіт 5/09 – П «Новітні енергетично ефективні харчові технології й нанотехнології в АПК» (№ держ. реєстрації 0109U000400), тематики держбюджетних досліджень проблемної науково-дослідної лабораторії Одеської національної академії харчових технологій № 8/15-П «Теорія і техніка сушіння термолабільної сировини при використанні інноваційних енергоефективних систем термотрансформації та адресної доставки енергії» (№ держреєстрації 0100U004570).

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є обґрунтування новітніх принципів організації термообробки харчової сировини для створення енергоефективних теплотехнологій, інноваційного тепломасообмінного обладнання та розробка і обґрунтування методів їх розрахунку і оптимізації.

Для здійснення поставленої мети необхідно вирішити такі основні **завдання**:

- на основі аналізу енергетичної ситуації провести структурне моделювання енерготехнологій для визначення основних протиріч і шляхів їх розв'язання;
- розробити математичні моделі теплотехнології вдосконалених за допомогою термотрансформації, теплоутилізації та принципів адресної доставки енергії для процесів сушіння, концентрування, екстрагування та генерації енергії;
- провести експериментальні дослідження для перевірки та уточнення розроблених моделей;
- розробити інженерні методики розрахунку і оптимізації обладнання удосконаленого за допомогою систем термотрансформації, теплоутилізації та принципів адресної доставки енергії, і реалізувати ці методики на ЕОМ;
- провести серію комп'ютерних експериментів з метою розробки типорозмірних рядів інноваційного енергоефективного обладнання;
- провести виробничі випробовування розробленого обладнання.

*Об'єкт дослідження* – теплотехнології харчових та переробних галузей АПК.

*Предмет дослідження* – технологічні процеси та обладнання для термотрансформації, теплоутилізації, сушіння, концентрування, екстрагування та генерації теплової енергії.

*Методи дослідження.* Методи аналізу та синтезу для розгляду літературних джерел та узагальнення результатів їх розбору, методи системного аналізу для оцінки ефективності енерготехнологій та їх удосконалення. Методи планування експерименту, теорія подібності, методи теплофізичного моделювання, регресійний аналіз для проведення експериментальних досліджень з використанням контрольно-вимірювальної апаратури і обробки та узагальнення результатів досліджень, методи енергетичного аудиту та менеджменту, математичне моделювання з використанням комп'ютерної техніки та прикладних програмних пакетів (Microsoft Excel, об'єктно-орієнтована мова програмування Delphi). Для вирішення диференціальних рівнянь використовувалися чисельні і аналітичні методи. Для розв'язання задач оптимізації використовувався метод покоординатного спуску.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі сформульовано і науково обґрунтовано наступні положення:

Використання принципів спрямованої доставки енергії до рідкої фази харчової сировини, дасть можливість управляти потоками енергії і організувати локальний перегрів рідини, точково перевести її в парову фазу, що викличе зростання тиску в цій точці, і ініціює специфічний гідродинамічний двофазний потік з капіляра в напрямку його відкритого торця. При цьому, процес руху потоку буде супроводжуватися збільшенням діаметра еластичного капіляра.

При використанні електромагнітних джерел енергії класичні процеси теплопередачі відсутні, а взаємодія цієї енергії і харчової сировини призводить до дисипації ЕМ енергії в теплову в результаті взаємодії з полярними молекулами рідкої фази. Потужність такого гідродинамічного потоку визначається співвідношенням сил інерції потоку і сил «капілярного гальмування», які залежать від питомої потужності електромагнітної енергії, властивостей харчової сировини і його структури.

Має існувати число подібності, яке враховує співвідношення сил «капілярного прискорення» і «капілярного гальмування» і дозволяє оцінити інтегральну продуктивність локальних джерел дифузії.

В результаті комплексу аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень **вперше:**

отримано структурні схеми удосконалення теплотехнологій;

отримано залежності для визначення швидкості перенесення рідини в капілярі за рахунок «механодифузії» в умовах адресної доставки енергії з урахуванням «капілярного гальмування»;

отримано безрозмірний критерій для визначення наявності «механодифузійного» ефекту.

запропоновано і науково обґрунтовано методику визначення показників ефективності тепломасообмінного обладнання.

У роботі розвинуто основи теорії тепломасопереносу та розширено уявлення і отримані структури рівнянь для розрахунку:

- процесів тепломасообміну в капілярних структурах
- тепловіддачі при кипінні розчинів твердих нелетких компонентів
- тепловіддачі оребрених поверхонь зі специфічним типом оребрення.
- часу сушіння продуктів в вакуумній сушарці.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому що запропоновані методики розрахунку і оптимізації та розроблені на їх основі програмні засоби дозволяють проектувати інноваційне обладнання для процесів сушіння, концентрування, екстрагування та генерації теплоти.

За допомогою розроблених засобів створена інноваційна вакуумна сушарка з системою термотрансформації, що пройшла виробничі випробовування на Української часникової компанії «Агропатріот» та ФОП «Дубовенко», та розрахована модифікована блочна сушарка, що дозволяє отримати екологічно безпечний продукт при витратах палива  $5,68 \text{ м}^3/\text{т}$ . Модуль розрахунку теплогенератора блочної сушарки може бути використаний для розрахунку енергоефективних систем забезпечення тепловою енергією інших промислових і побутових об'єктів.

Комп'ютерна програма розрахунку мікрохвильового екстрактора, заснована на результатах експериментального моделювання кінетики взаємодії кавопродуктів і води, може бути застосована для проектування подібних систем в широкому діапазоні зміни параметрів. Обґрунтований типорозмірний ряд МХ екстракторів безперервної дії рекомендується до впровадження. Результати досліджень використовувались в міській цільовій програмі «Енергозбереження у місті Теплодар, Одеської області на 2007 – 2011 роки». Засоби для виробництва неенергоємних продуктів рекомендовані для впровадження НТР ЗАТ «Іноваційний фонд». Також прикладні програми для розрахунку екстракторів рекомендовані до використання компаніями СП «ГАЛКА Лтд» та ПАТ «Енни Фудз».

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес ОНАХТ у вигляді електронного посібника з курсу «Енергозбереження», монографій «Інновационные теплотехнологии АПК на основе теплових труб», «Сучасний стан галузей національної економіки України: проблеми та шляхи розвитку», пакету прикладних програм комп'ютерного моделювання та оптимізації екстракторів, пакету програм розрахунку і оптимізації теплогенеруючого обладнання, програми розрахунку блочної зерносушарки для використання при самостійній роботі студентів що навчаються за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент» спец. 144 «Теплоенергетика» по дисциплінам: «Енергоефективні режими та технології», «Інноваційні енерготехнології в АПК», «Енергетичний менеджмент в промисловій та муніципальній теплоенергетиці», «Організація наукових досліджень та математичні моделі та методи оптимізації».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, узагальнення та висновки наведені в дисертаційній роботі отримані автором особисто. Здобувачем здійснено наукове обґрунтування формулювання проблеми, завдань та програми досліджень, розроблено методику їх проведення.

Спільно з науковим консультантом (проф. Бурдо О.Г.) формулював наукові положення і концепції наукових досліджень.

У співавторстві з проф. Смірновим Г.Ф. була запропонована гіпотеза «капілярного гальмування» при сушінні, що була у подальшому розвинута автором та застосована у моделі перенесення вологи в капілярах при адресному підведенні енергії.

Автор планував дослідження теплообміну газових потоків з оребреними поверхнями з специфічним характером оребрення та циркуляції парорідинної суміші при кипінні в трубах, особисто провів дослідження процесу теплообміну при кипінні харчових розчинів. Самостійно узагальнив результати цих досліджень і запропонував основи теорії тепломасопереносу при процесах зневоднення в умовах адресної доставки енергії.

Разом з асп. Різніченко проводив дослідження процесів концентрування розчинів в установці з термотрансформатором.

Спільно з асп. Макієвською Т.Л. та Левтринською Ю.О., та доц. Терзієвим С.Г. досліджував аналітичні та експериментальні моделі кінетики екстрагування кавового шלאму та кави, оптимізації процесу масопереносу екстрактивних речовин з твердої фази в рідину, представляв наукові доповіді і готував публікації. Брав участь в проектуванні нових зразків техніки (ТМУ, МХ-екстракторів, сушарок, теплогенераторів), отриманні інноваційних неенергоємних та екологічно безпечних продуктів.

Займався впровадженням інноваційних зразків техніки і продуктів в агропромисловій та переробній галузі промисловості України.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і науковців Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) в 2004 ... 2018 рр .: на Міжнародних наукових конференціях Енергоефективність – 2004, "Проблеми промислової теплотехники" 2005р, Хлібопродукти – 2005, Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2008, Повышение энергет. эффективности пищевых и хим. пр-в. (Одеса 2007)., Совершенствование процессов и оборудования пищевых и химических производств (Одеса 2008), Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011, Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини (Харьків 2011), «Проблеми ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-

2014), Second International Conference "Heat Pipes for Space Application" (2HPSA), Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р. Heat pipes, heat pumps, refrigerators, and power sources. the IX Minsk International Seminar Minsk, Belarus 2015, Минский международный форум по тепло- и массообмену, ИТМО, Минск 2016, Международная научно-техническая конференция, посвящённая 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского (МНТК Плановский - 2016) «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности».

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 47 наукових робіт, з них 2 монографії, 19 статей у фахових виданнях України, в тому числі 3 входять до наукометричних баз; 4 статті у виданнях іноземних держав, 5 патентів на корисну модель, тези 11 доповідей у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з 10 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертаційну роботу викладено на 310 сторінках основного тексту, вона містить 35 таблиць (12 стор.), 209 рисунків (79 стор.) та 16 додатків (164 стор. другий том роботи).

Список джерел налічує 402 найменування, у тому числі 128 іноземних.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи та її актуальність, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну та відображено практичну цінність отриманих результатів. Показано результати апробацій та особистий внесок здобувача в проведених дослідженнях і публікаціях.

У **першому розділі** «Проблеми сучасних теплотехнологій АПК» проаналізовано стан енергетичної ситуації в країні і світі. Показано, що незважаючи на показники загального енергоспоживання, що невинно зменшуються і знаходяться на середньому для країн Європи рівні, енергоємність валового внутрішнього продукту в 2 – 8 разів перевищує цей показник для країн Європейського Союзу. У порівнянні з країнами ЄС Україна має значний потенціал підвищення енергоефективності. І агропромисловий комплекс не є виключенням. В агропромисловому комплексі України є можливості для зниження питомих енерговитрат. В першу чергу слід звернути увагу на такі енерговитратні процеси як зневоднення продукту та вилучення цільових компонентів. Аналіз структури енергетичних потоків показав, що напрямки підвищення ефективності енерготехнологій АПК слід шукати в покращенні систем трансформації енергії, можливості її утилізації та можливого зменшення дисипації енергії в теплоносії і продукті.

У **другому розділі** «Характеристика об'єктів, методологія і техніка дослі-

джені» проаналізовано структурні моделі енерготехнологій. За підсумками цього аналізу сформульована загальна наукова проблема, робочі гіпотези, мета, завдання і етапи аналітичних і експериментальних досліджень.

Загальна наукова проблема полягає в тому, що сучасні тепло технології АПК основані, як правило на використанні проміжного теплоносія для обробки сировини. Засобами інтенсифікації процесів тепломасообміну є підвищення швидкості руху теплоносія, тобто його витрат. Але це було пов'язано з підвищенням витрат енергії з відпрацьованим теплоносієм. Виникло протиріччя між новими вимогами енергоефективності та традиційними засобами удосконалення техніки.

Для рішення цієї проблеми обґрунтовано перспективи новітніх принципів організації термообробки харчової сировини для створення енергоефективних теплотехнологій. Для чого прийнята робоча гіпотеза: використання ефекту адресної доставки енергії до мікрокапілярів сировини дозволить вирішити сучасну проблему створення тепломасобмінної апаратури при зменшенні витрат енергії. Для підтвердження гіпотези необхідно провести виробничі випробовування інноваційної техніки, яка використовує ефект адресної доставки енергії, для чого, в свою чергу, потрібно розвинути наукові основи створення такого обладнання.

За допомогою системного аналізу також з'ясовано, що основним протиріччям при виробництві теплової енергії є невідповідність потенціалу енергії, що утворюється при її генерації тепловим методом і необхідним потенціалом для її використання кінцевим споживачем в харчових виробництвах. Рішення цього протиріччя потребує встановлення додаткових ступенів трансформації енергії. Та у відповідності до вимог сучасності, синтез екоіндустріальної технології ґрунтується на інноваційних принципах організації процесів переносу до яких відносяться: принципи адресної доставки енергії до елементів харчової сировини; наноенерготехнології; вакуумні та хвильові технології; комбіновані технології; ініціювання «бародифузії» та «механо-дифузійних» явищ. Проведений аналіз сучасних принципів енергопідводу дозволив зробити висновок, що забезпечення ефективного підведення енергії, адресної її доставки до елементів харчової сировини можуть вирішуватися на базі сучасних пристроїв – теплових труб, термосифонів, мікрохвильового випромінювання. Проблема невідповідності температурних потенціалів генератора і споживача може бути вирішена при використанні в теплогенераторах вакуумної випарно-конденсаційної схеми трансформації енергії, що дозволяє ефективно доставляти тепло споживачам, більш повно використовувати теплоту топкових газів, зменшити температуру поверхні, що контактує з продуктом при збереженні низького внутрішнього термічного опору.

Для рішення поставлених задач сформована програма досліджень представлена на рис. 1. В рамках аналітичних досліджень проведено аналіз енергетичної ситуації в Україні і світі в результаті якого підтверджена актуальність досліджень

пов'язаних з покращенням енергетичної ефективності підприємств харчової і переробної галузі, а, також, з'ясовані перспективні напрями досліджень. Прийнято рішення зосередити увагу на процесах зневоднення, зокрема сушіння та концентрування, та екстрагування.

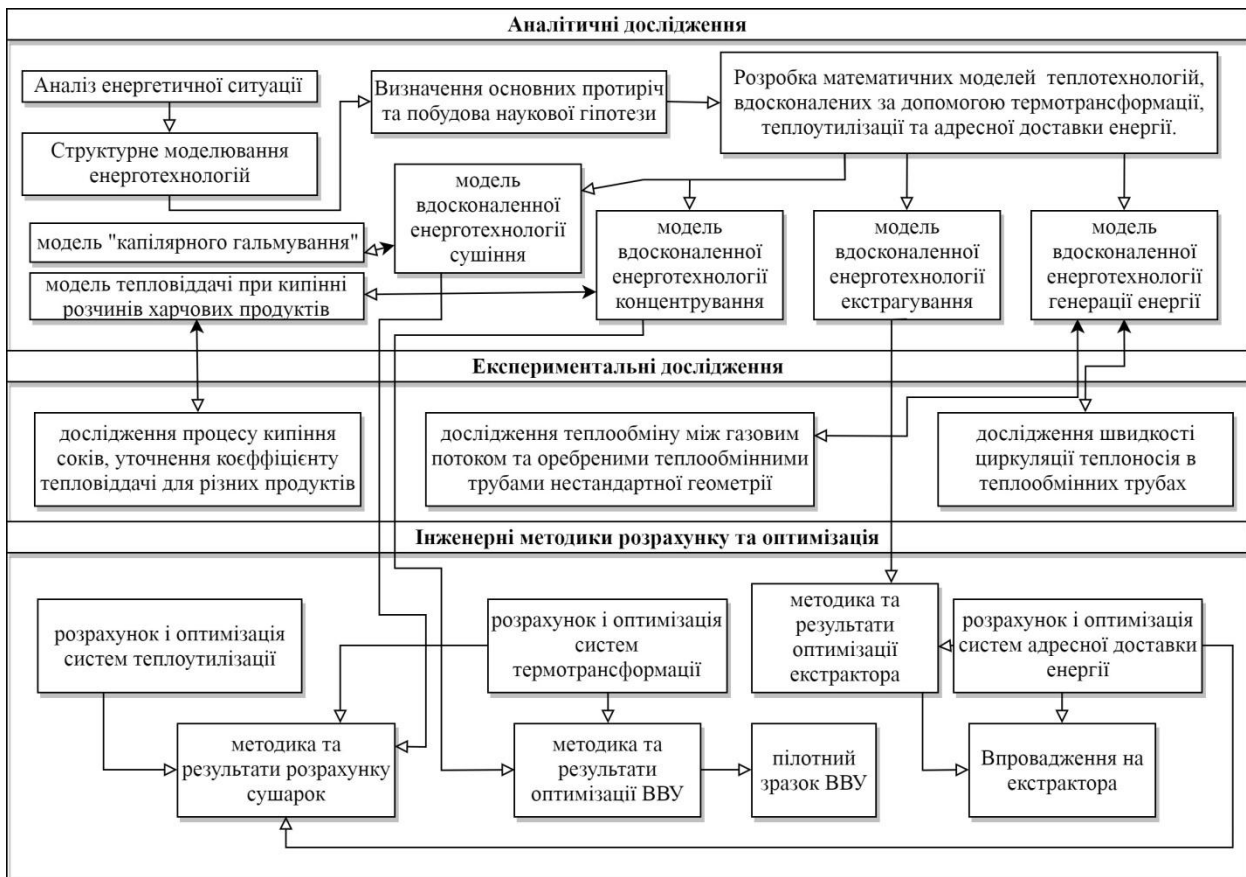


Рис. 1 Програма досліджень.

Програма передбачає аналітичне моделювання теплотехнологій вдосконалених за допомогою систем термотрансформації та адресної доставки енергії. В якості об'єктів прийняті енерготехнології процесів сушіння, концентрування, екстрагування та процесів генерації енергії. Моделі процесів споживання та постачання енергії можуть бути об'єднані в цілісну енерготехнологічну систему, для дослідження якої використовуються методи системного аналізу та синтезу. Використання системного аналізу дозволяє перейти на більш високий рівень досліджень і розглядати проблеми енерготехнологічної системи в цілому. На першому етапі аналізу відбувається формулювання проблеми, що складається з висування центрального питання проблеми підвищення енергетичної ефективності АПК України та приведення показників енергоємності до європейського рівня, констрадікції (фіксації протиріччя, між фактичним споживанням енергії та фізично необхідним мінімумом енергії для проведення технологічного процесу), фінітізації (можливого опису очікуваного результату) – використання систем термотрансформації та адресної доставки енергії дозволить споживати тільки необхідну кількість енергії.

Далі на основі аналізу структур енерготехнологічних систем з'ясовується єдність поставленої проблеми та шляхів її розв'язання. Проводиться декомпозиція загальної енерготехнологічної системи на підсистеми та виявляються локальні проблеми кожної підсистеми і шляхи їх вирішення. Для оцінки ефективності запропонованих рішень використовують методи математичного моделювання. Специфічність поставлених задач потребує доповнення існуючого аналітичного опису процесів.

Концепція аналітичного моделювання кожної підсистеми, що розглядається в роботі викладена далі в цьому розділі. Аналітичне моделювання визначає задачі для експериментальних досліджень. Отримані в результаті експериментальних досліджень залежності стануть основою для програм розрахунку вдосконаленого обладнання і технологічних схем. Процедури локальної оптимізації дозволять визначити раціональні режимні та конструктивні параметри обладнання.

Наступним етапом має бути синтез загальної енерготехнологічної системи та її параметрична оптимізація. При цьому параметри, що були отримані при локальній оптимізації окремих підсистем можуть не задовольняти умовам оптимальності системи. Тому доводиться використовувати спеціальні методи, детальніше викладені в розділі 9.

На останньому етапі роботи планується проведення виробничих випробувань запропонованих рішень їх економічна оцінка та впровадження у виробництво.

У **третьому розділі** «Системний аналіз енерготехнологій» приведена класифікація інноваційних підходів до енерготехнологій в харчових виробництвах.

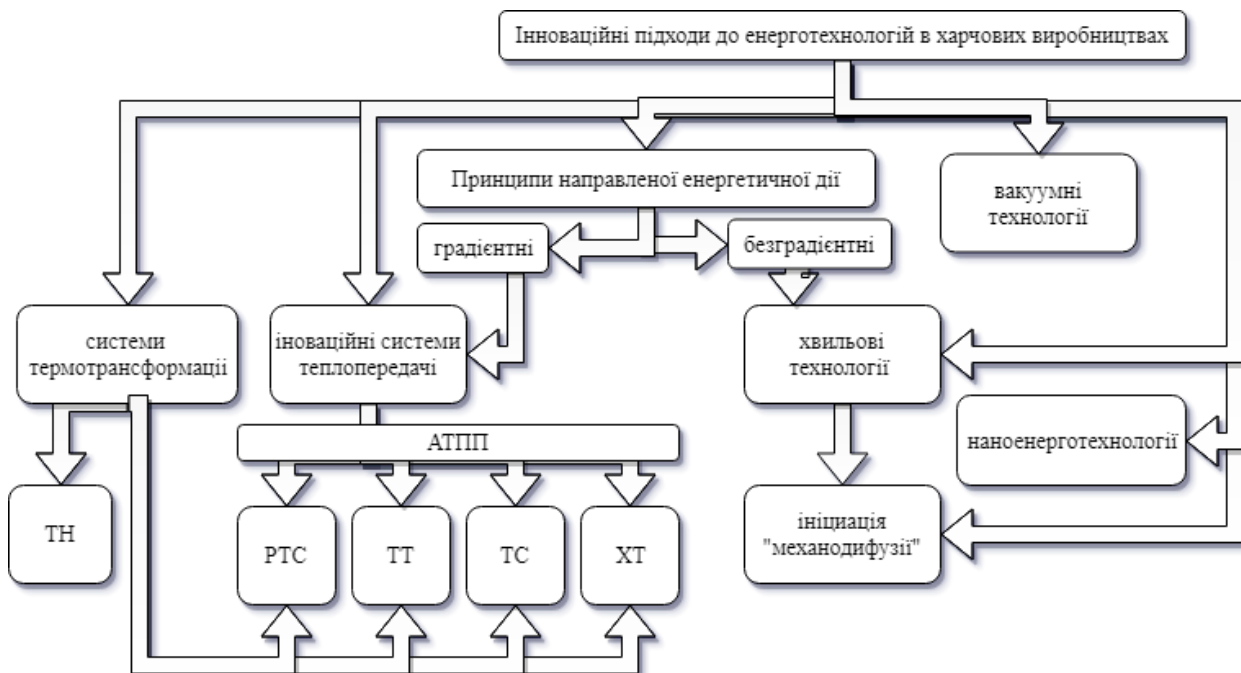


Рис. 2. Класифікація інноваційних підходів до енерготехнологій.

Запропоновано два напрямки організації адресної доставки енергії до продукту: градієнтний і без градієнтний (рис. 2).

Нові принципи конструювання теплотехнічних апаратів харчових виробництв можна розвинути на основі замкнутих випарно-конденсаційних контурів (парових камер), перевагою яких є мала інерційність і високий ступінь ізотермічності теплообмінної поверхні. Приведено термодинамічні схеми процесів з автономними тепло передаючими пристроями (АТПП) та відзначено, що їх основними перевагами є ав-

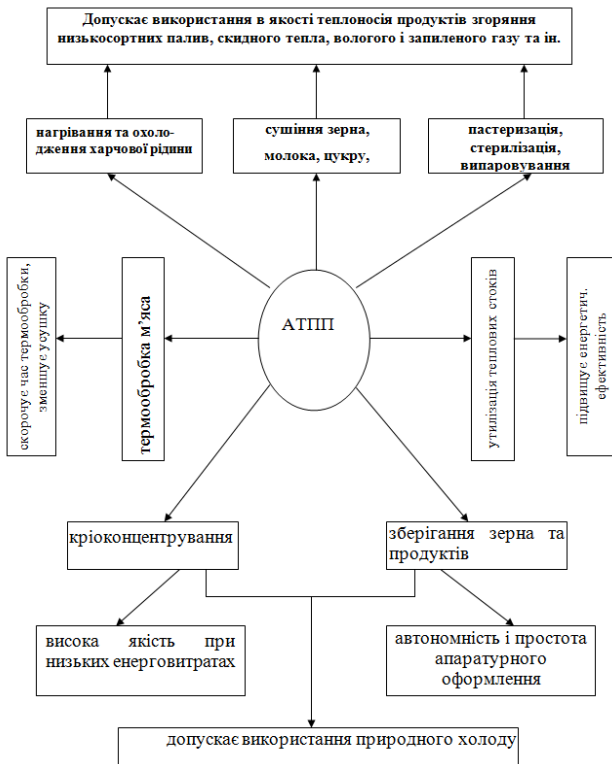


Рис. 3. Класифікація напрямків використання АТПП.

тономність, простота конструкції, відсутність витрат енергії на транспортування теплоносія, безшумність, висока надійність в роботі, високий ступінь безпеки системи, надзвичайно низький внутрішній термічний опір, висока ізотермічність гріючої поверхні. Ці переваги дозволяють очікувати позитивний ефект від застосування АТПП в різних галузях харчової і переробної промисловості. Коло завдань, які можна вирішувати в теплотехнології АПК на основі АТПП, надзвичайно широке. Природно, не всі завдання однаково перспективні, не всі рішення в даний час знайдені. Однак, на основі виконаної класифікації (рис. 3) очевидно, що напрямок використання АТПП в теплотехнологіях АПК є новим, актуальним і перспективним, і таким, що представляє науковий інтерес як для харчової теплотехнології, так і для теорії і практики самих АТПП. Прикладом інноваційного теплогенеруючого обладнання з використанням двофазних випарно-конденсаційних систем є випарно-конденсаційна схема, що дозволяє ефективно доставляти тепло споживачам, більш повно використовувати теплоту топкових газів, зменшити температуру поверхні, що контактує з продуктом при збереженні низького внутрішнього термічного опору.

В четвертому розділі «Основи теорії «капілярного гальмування» в умовах адресної доставки енергії» розглянуто відмінності механізмів адресної доставки енергії від традиційних теплотехнологій для процесів де є необхідність передачі енергії до вологи, що знаходиться в середині твердого тіла. При традиційній доставці енергії вона передається спочатку до продукту, температура якого збільшується, і далі від продукту енергія передається до вологи, тобто значна частина енергії витрачається непродуктивно на нагрівання продукту. Схема адресної доставки енергії

В четвертому розділі «Основи теорії «капілярного гальмування» в умовах адресної доставки енергії» розглянуто відмінності механізмів адресної доставки енергії від традиційних теплотехнологій для процесів де є необхідність передачі енергії до вологи, що знаходиться в середині твердого тіла. При традиційній доставці енергії вона передається спочатку до продукту, температура якого збільшується, і далі від продукту енергія передається до вологи, тобто значна частина енергії витрачається непродуктивно на нагрівання продукту. Схема адресної доставки енергії

характеризується іншим направленням. При організації адресної доставки, енергія потрапляє до внутрішньої вологи, яка має в ній потребу. Мінімізувати втрати енергії на нагрів продукти при адресній доставці енергії можливо якщо забезпечити доставку тільки необхідної кількості енергії. Враховуючи, що більша частина сухого матеріалу харчових продуктів є діелектриками вважається доцільним забезпечити реалізацію схеми адресної доставки енергії за допомогою мікрохвильового випромінювання. Враховуючи капілярну внутрішню структуру багатьох харчових продуктів (рис. 4) можна припустити виникнення додаткових рушійних сил всередині капілярів, що викликають рух рідини в капілярах і видалення вологи із продукту і у рідкій фазі. НВЧ випромінювання проникає вглиб капілярно – пористого тіла, викликає локальні перегріву всередині капілярів, що призводить до появи парових бульбашок в локальних центрах пароутворення з відповідним підвищенням тиску. Електротеплофізична модель пов'язаних процесів, що мають місце при мікрохвильовому способі адресної доставки енергії представлена на рис. 5. В процесі адресної доставки енергії за допомогою мікрохвильового поля можна виділити також декілька рівнів конверсії енергії.

Так на першому рівні відбувається перетворення електричної енергії в енергію мікрохвильового випромінювання. На другому рівні відбувається перетворення енергії електромагнітних хвиль в теплову.



Рис. 5. Електротеплофізична модель пов'язаних процесів масопереносу.

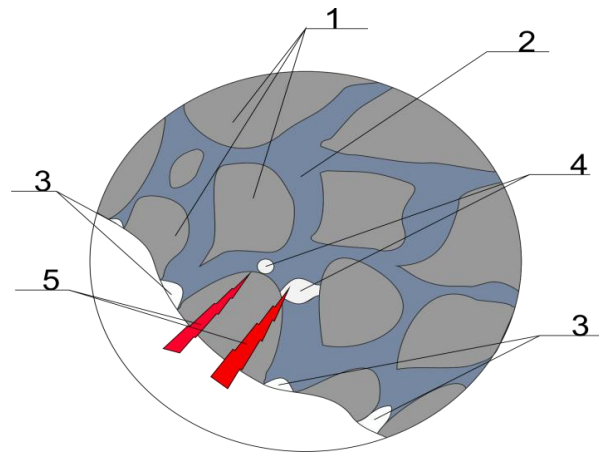


Рис. 4. Адресна доставка енергії до вологи в середині капілярно-пористого тіла: 1 – сухий матеріал, 2 – волога в капілярах, 3 – пароповітряна суміш, 4 – парові бульбашки, 5 – НВЧ випромінювання.

Внаслідок нерівномірності напруженості електромагнітного поля та структури самого матеріалу в процесі нагріву можливі локальні перегріву рідини в яких можливо формування точкових центрів пароутворення. В точках локального перегріву відбуваються процеси підвищення тиску, що спричиняє бародифузію із точкових джерел. Крім того локальні підвищення тиску є рушійною силою, що викликає

рух рідини з капіляру на поверхню. Разом з рухомою рідиною на поверхню можуть виноситись і цільові компоненти, що не розчиняються у ній і не можуть бути перенесені за рахунок молекулярної дифузії. Для того, щоб описані процеси мали місце необхідна певна щільність потоку енергії, що забезпечує швидкість перегріву більшу за швидкість релаксації температурних напружень. Крім того, за наявності парової фази в капілярі, для забезпечення руху рідкої фази градієнт тиску, що виник в капілярі, повинен перевищувати гідравлічні опори та капілярні сили. З урахуванням сил «капілярного гальмування» та «капілярного прискорення» рівняння Пуазейля для визначення швидкості руху рідини в капілярах запишемо у наступному вигляді

$$w = \frac{d_k^2}{32 \cdot l \cdot \mu} * \left( \Delta P - \sum_{i=0}^n \frac{2\sigma}{1/R_{1i} - 1/R_{2i}} \right), \quad (1)$$

де:  $R_{1i}, R_{2i}$  – радіуси кривизни поверхонь, що обмежують кожній рідинний прошарок;  $l$  – довжина капіляра,  $n$  – кількість рідинних прошарків,  $d_k$  – діаметр капіляру,  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини,  $\Delta P$  – градієнт тиску,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

Враховуючи витрати енергії на збільшення об'єму парової бульбашки швидкість руху рідини і капілярі за рахунок цього розширення може бути визначена як:

$$w = \frac{d_k^2 \cdot r \cdot \left( \Delta P - l \cdot \rho \cdot \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{4\sigma \cdot \cos\theta}{d_k} \right)}{128 \cdot l \cdot \mu \cdot \Delta P \cdot \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho} \right)}, \quad (2)$$

де:  $\rho$  – густина рідини,  $\rho_v$  – густина пари,  $\theta$  – крайовий кут змочування,  $r$  – питома теплота пароутворення.

Визначене значення швидкості використовується для знаходження чисельного рішення задачі перенесення вологи в середині капіляру під дією адресного впливу мікрохвильового випромінювання згідно з наступним алгоритмом. Спочатку визначаємо геометрію об'єкту і початкові та граничні умови. Потім задаємося дискретизацією об'єкту в часі та просторі розрахувавши величину дискретизації у відповідності до заданих чисел Куранта, що забезпечить збіжність рішення. Далі для кожного моменту часу в кожній точці розрахункової сітки проводяться розрахунки теплофізичних параметрів рідини в капілярі, розраховується кількість поглинутого випромінювання. Визначається можливість утворення парової бульбашки в цій точці, за наявності парової бульбашки розраховується зміна її об'єму, визначається яка частина поглинутої енергії на це витрачається і швидкість рідини в капілярі. Визначається значення температури в цій точці сітки для наступного моменту часу.

Характер процесів переносу у капілярах може характеризувати відношення сил «капілярного прискорення» до сил «капілярного гальмування»:

$$K_z = \frac{d_k r_v \rho_v \rho_w}{\Delta \rho \sigma}, \quad (3)$$

де:  $r_v$  – питома теплота пароутворення,  $\rho_v$  – густина пари,  $\rho_w$  – густина рідини,  $\Delta\rho$  – різниця між густиною рідини та пари.

Процес конвективного перенесення в капілярі починається при  $K_z > 1$ .

Для градієнтного способу підведення енергії представлена модель сушіння шару дисперсного матеріалу. Енергія в середину шару доставляється за допомогою двофазних випарно-конденсаційних пристроїв. При цьому реалізуються нестационарні умови теплообміну при яких істотно змінюються в часі не тільки основні параметри, але і фізичні картини процесу. Тому процес слід розглядати як такий, що складається з декількох етапів (стадій), кожній з яких відповідає «своя» фізична картина і модель, що відповідає їй. Первинним в процесі є прогрів шару від гарячих поверхонь. Динаміка прогріву поверхні, що гріє може бути визначена як:

$$t_1 - t_{oc} = \frac{A_1}{B_1} \cdot [1 - \exp(-B_1 \cdot \tau)]$$

$$A_1 = Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2)$$

$$B_1 = \alpha_3 \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2),$$
(4)

де:  $t_{oc}$  – температура навколишнього середовища,  $M_1$  – маса нагрівача,  $M_2$  – маса проміжного теплоносія,  $C_1$  – теплоємність нагрівача,  $C_2$  – теплоємність проміжного теплоносія,  $Q$  – тепловий потік,  $S_{32}$  – масштаб зовнішньої поверхні нагрівача, від якої відводиться тепло в навколишнє середовище,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\tau$  – час від початку нагрівання,  $A_1$ ,  $B_1$  – комплекси, що характеризують інтенсивність нагріву.

В процесі прогріву змінюється співвідношення між прогрітими частинами шару і частинами шару з приблизно постійною температурою. Це співвідношення повинно враховуватися в першу чергу, і воно знайдено з рішення відповідної задачі нестационарної теплопровідності.

$$Z_{11i} = \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{Fo_i}} \right) - \exp \left[ \frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\text{эф}}} \cdot L_1 \cdot \frac{(a_{22})^2}{(\lambda_{\text{эф}})^2} \cdot a_e \cdot \tau_i \right] \times$$

$$\times \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2\sqrt{Fo_i}} + \frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\text{эф}}} \sqrt{a_e \cdot \tau_i} \right]$$

$$t_{3i} = t_{oc} + Z_{11i} (t_{3i-1} - t_{oc}),$$
(5)

де:  $\alpha_{22}$ ;  $\lambda_{\text{эф}}$ ;  $L_1$ ;  $Fo_{0i}$ ;  $a_e$ ;  $\tau_i$  – коефіцієнт тепловіддачі; ефективний коефіцієнт теплопровідності в зерновому шарі; його визначальний розмір; число Фур'є до моменту часу (в схемі розрахунку); ефективний коефіцієнт температуропровідності; масштаб часу, відповідно.

Передбачається, що розвивається процес випаровування вологи з зовнішньої поверхні зерен в межах перегрітої частини шару, що визначена як

$$\delta_0 = \sqrt{C_0 \cdot a_e \cdot \tau_i}, \quad (6)$$

де:  $C_0$  – стала, що залежить від розмірів зерновки.

«Рушійною силою» цього процесу є перепад парціальних тисків водяної пари всередині порового об'єму перегрітої частини шару. При цьому цей перепад визначається як різниця між парціальним тиском на зовнішній поверхні перегрітої частини зернового шару і середнім парціальним тиском всередині порового об'єму цієї частини шару. Також в моделі сушіння ураховано механізм «капілярного гальмування» який призводить до зменшення рушійної сили процесу сушіння. Запропоновано існування як мінімум двох форм гальмування під час сушіння. Перша проявляється, коли волога на поверхні починає зникати. Механізм «капілярного гальмування» виникає за рахунок стоншення поверхневої плівки рідини і переміщення її до місць контакту окремих зерен з утворенням «водяних містків». В процесі випаровування в цих місцях «заглиблюються» криволінійні поверхні розділу фаз «пара – рідина». При цьому кривизна цих границь розділу зростає, що веде до появи істотного за величиною «капілярного тиску» що знижує «рушійну силу» процесу масовіддачі. В подальшому фронт випаровування переміщується в глибину капілярів, де кривизна поверхні залежить від діаметрів капілярів і проявляється друга форма «капілярного гальмування», що враховано в моделі другого періоду сушіння. Концентрація (масштаб парціального тиску) водяної пари і повітря всередині цієї частини порового об'єму визначається з таких міркувань: З одного боку відбувається «винесення повітря» разом з вологою, що випаровується. Середня швидкість цього виносу визначається умовами «фільтрації пара і повітря» з порового об'єму:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dG1}{d\tau} = \beta [P_n - (P_{pv} + dP_{pv})] \cdot V \cdot S_y \\ \frac{dG2}{d\tau} = \frac{K_f}{\delta_{30} \cdot \mu} \cdot [(P_{sl} + dP_{sl}) - P_0] \cdot \rho_a \cdot S_y \cdot V \\ \frac{dG3}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_v T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\ \frac{dG4}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \cdot \pi \cdot L_t \cdot (D_t + 2\delta_e) \\ dM = dG1 - dG2 - dG3 + dG4 \\ dM = dM_a + dM_v \\ dM_a = -\frac{1}{1+x} dG2 + dG3 \\ dM_v = dG1 - \frac{x}{1+x} dG2 - dG3 \end{array} \right. \quad (7)$$

де:  $G_1$  – потік водяної пари з поверхні зерна,  $G_2$  – фільтраційний потік крізь шар матеріалу,  $G_3$  – дифузійний потік водяної пари,  $G_4$  – дифузійний потік повітря.

Ця фільтрація здійснюється під дією деякого градієнта тисків, пропорційного «рушійному натиску». З іншого боку має місце дифузія повітря із зовнішнього середовища в поровий простір і водяної пари в зворотному напрямку. Баланс цих «впливів» і визначає динаміку зміни відповідного парціального тиску всередині порового об'єму для активної (істотно перегрітої) частини шару.

Запропонований підхід є новим кроком в описі внутрішніх механізмів процесу сушіння. Він корисний для поглиблення аналізу внутрішнього механізму процесів сушіння. Він може бути розвинений для різних об'єктів сушки, з урахуванням конкретних їх особливостей.

Розроблена модель сушіння сипкого матеріалу при адресній доставці енергії була реалізована на ЕОМ, що дозволило дослідити вплив параметрів шару сипкого матеріалу на інтенсивність процесу сушіння. Розроблені програми розрахунків можуть бути використані як для поглиблення аналізу внутрішнього механізму сушіння так для розрахунку параметрів інноваційних сушарок, запропонованих далі.

У п'ятому розділі «Розвиток теорії процесів сушіння і обладнання для їх реалізації» проведено аналіз існуючого потенціалу енергоефективності процесів сушіння, та існуючих варіантів схем адресного підведення енергії до сипучого матеріалу. На основі проведеного аналізу запропоновано модифіковану блочну сушарку, в якій енергія згоряння палива передається до продукту за допомогою системи термотрансформації на основі двофазного випарно-конденсаційного контуру. Це вирішує проблему невідповідності температурних потенціалів продуктів згоряння і продукту, дозволяє максимально повно використовувати енергію палива при забезпеченні екологічної безпеки продукту. Модифікована блочна зерносушарка (рис. 6) складається з теплогенератора 1, сушильної шахти 2, шарового підігрівача зерна 3, двофазного випарно – конденсаційного контуру 4, термосифонного калорифера 5.

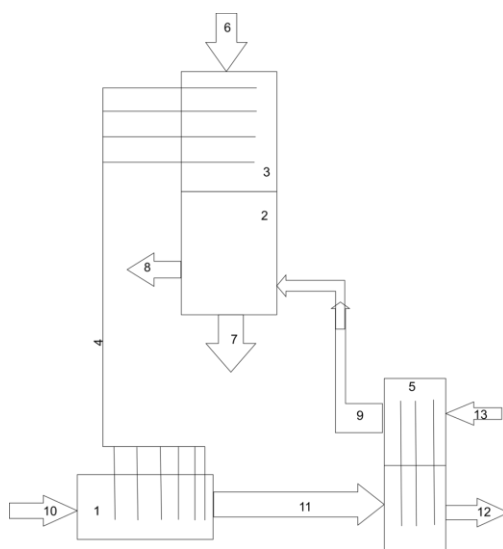


Рис. 6. Модифікована блочна сушарка.

печенні екологічної безпеки продукту. Модифікована блочна зерносушарка (рис. 6) складається з теплогенератора 1, сушильної шахти 2, шарового підігрівача зерна 3, двофазного випарно – конденсаційного контуру 4, термосифонного калорифера 5.

Зерновий потік 6 потрапляє в шаровий підігрівач 3, де розташовані конденсаційні ділянки двофазного випарно-конденсаційного контуру. Підігріте в шаровому підігрівачі зерно потрапляє в сушильну шахту 3, де крізь нього проходить потік сушильного агента 9, підігрітого в термосифонному калорифері 5. Випарні ділянки двофазного контуру розташовані в топковій камері теплогенератора 1, де сприймають теплоту від факелу та

продуктів згоряння шляхом випромінювання та конвекції. Використання випарно-конденсаційного контуру дозволяє ефективно передавати теплоту від продуктів згоряння шару сипкого матеріалу. Вакуум, створений в двофазному контурі дозволяє зменшити температуру кипіння проміжного теплоносія, що призводить до збільшення температурного напору, а, відповідно, і покращення умов теплопередачі в теплогенераторі, а також, покращення його масогабаритних характеристик. До того ж, вакуумування двофазного контуру призводить до зменшення температури конденсації проміжного теплоносія в шаровому підігрівачі, що потрібно для збереження якості продукту. Продукти згоряння 11 потрапляють в газохід калорифера 5, де розташовані випарники термосифонів. Конденсатори термосифонів розташовані в газоході в який поступає навколишнє повітря 13, що нагрівається до температури сушильного агента 9.

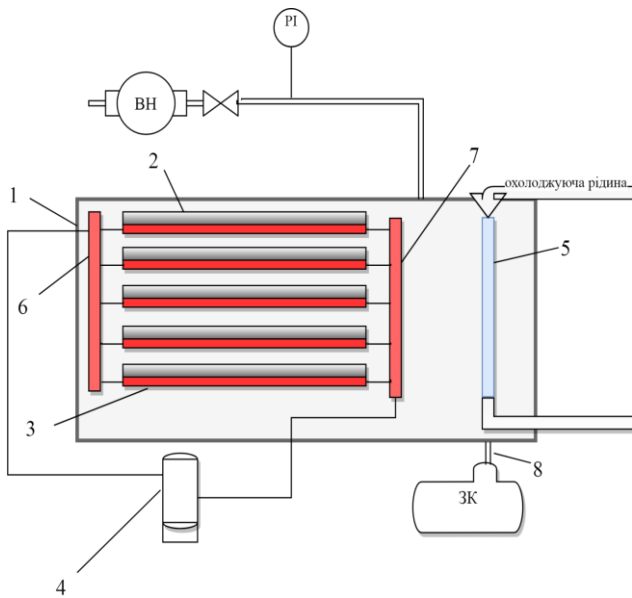


Рис. 7. Вакуумна сушарка з термотрансформатором.

У випадку якщо за технологією потрібні більш високі температури сушильного агента можлива інша компоновка модулів блочної сушарки в якій сушильний агент нагрівається за допомогою двофазного контуру в теплоплогенераторі, а топкові гази, що йдуть, потрапляють в газохід шарового підігрівача. Зде за допомогою термосифонів підігрівають продукт. Тим самим ефективно використовується теплота продуктів згоряння.

Для термолабільних продуктів запропоновано інноваційну вакуумну сушарку в якій теплопередача до поверхні продукту здійснюється за допомогою двофазного ви-

парно-конденсаційного контуру (рис. 7). Проведені дослідження свідчать, що за рахунок цього нерівномірність температурного поля при сушінні продукту не перевищує  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . До того ж розташування поверхні для конденсації пари всередині сушильної камери дозволило відводити з установки не пару, а конденсат, що значно знизило гідродинамічний опір лінії відведення вологи, що видаляється і спростило експлуатацію установки. Установка складається з вакуумної сушильної камери 1, в якій на піддонах 2 розміщується шар сировини. Піддони встановлюються на полицях 3, які є конденсаторами двофазної випарно-конденсаційної системи, що складається з парогенератора 4, паропроводу, парового колектора 6, колектора конденсату 7 і конденсатопроводу. Пара, що утворюється при сушінні конденсується на

холодній поверхні 5, що охолоджується охолоджувальною рідиною. Вакуум в камері 1 забезпечується за допомогою вакуум-насосу (ВН).

Для дослідження вакуумної сушарки була використана рослинна сировина та морепродукти. Сушіння проводилось в умовах тиску в камері 10 кПа, та температури на поверхні полиць 60 °С. Типові експериментальні криві сушіння представлені на рис. 8.

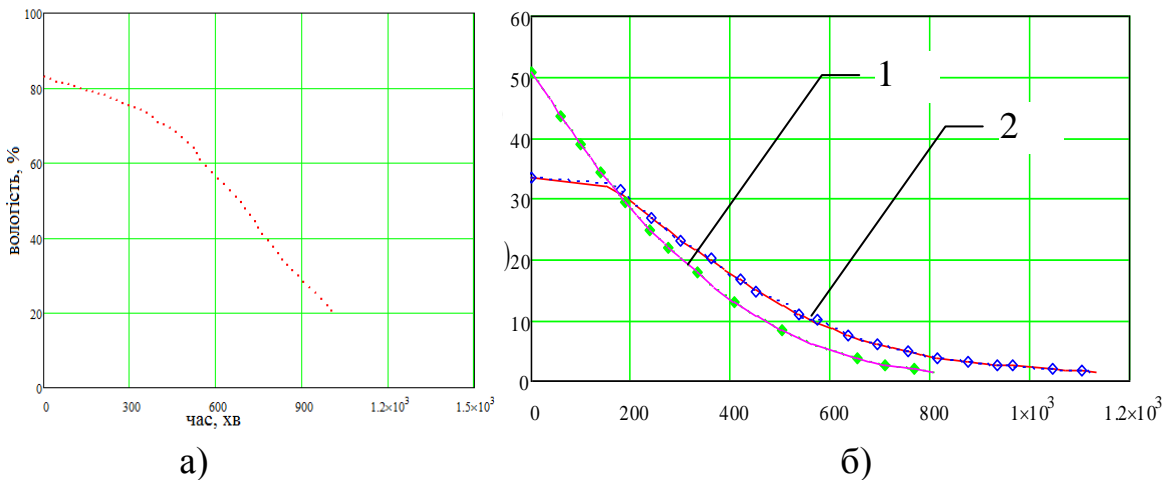


Рис. 8. Криві сушіння для яблук (а) та мідій (б) при початковій вологості:  $W_1=50\%$  (1) і  $W_1=35\%$  (2).

Користуючись методом приведеної швидкості сушіння можемо визначити коефіцієнти  $A$  та  $\beta$  для розрахунку тривалості сушіння.

$$\tau_x = \frac{1}{N_s} \left[ (W_1 - W_k) + A \cdot \ln \left( \frac{W_k - W_p}{W_2 - W_p} \right) + \beta \cdot (W_k - W_2) \right] \quad (8)$$

де:  $W_1$  – початкова вологість,  $W_2$  – кінцева вологість,  $W_k$  – критична вологість,  $W_p$  – рівноважна вологість,  $N_s$  – максимальна швидкість сушіння.

У результаті отримали значення  $A=17,5\%$  та  $\beta=0,45$ , за якими можна розраховувати час сушіння мідій в розробленій вакуумній сушарці. Враховуючи характер кривої сушіння яблук запропоновано модифіковану формулу для визначення часу сушіння:

$$\tau_x = \frac{1}{N_s} \left[ \text{const1} + A \cdot \ln \left( \frac{W_n - W_2}{W_2} \right) + \beta \cdot (W_n - W_2) \right], \quad (9)$$

де  $\text{const1}=69\%$ ,  $A=20\%$ ,  $\beta=0.012$ .

Отримані рівняння використовують при проектуванні установок такого типу.

**В шостому розділі** «Розробка енергоефективної техніки для процесів концентрування» проаналізовано основні шляхи підвищення енергоефективності процесів концентрування і показано, що системи термотрансформації на основі двофазного випано-конденсаційного контуру дозволили, також, підвищити енергоефективність процесів концентрування харчових розчинів в ВВУ.

За допомогою діаграми енергетичних потоків була наглядно оцінена величина необхідної на процес енергії (рис. 9). Енергія в систему підводиться разом з том 8 та живленням електродвигуна компресора 4. Електрична енергія 4 витрачається на збільшення ентальпії пари холодоагенту 3 шляхом його стиснення.

Далі холодильний агент надходить в конденсатор теплового насосу (КТН) де в процесі конденсації основна частина енергії 7 передається продукту в гріючій камері 8. Далі рідкий холодильний агент надходить в випарник теплового насосу (ИТН) де отримує енергію конденсації вторинної пари 1, що конденсується у конденсаторі вторинної пари (КВП). ким чином, теоретично, електрична енергія витрачається на підігрів ту і вторинної пари і на компенсацію втрат в навколишнє середовище. Але наближення до цієї величини потребує необхідних режимних та них параметрів. Розроблена програма розрахунку таких параметрів потребувала уточнених значень коефіцієнтів редахі при кипінні розчинів нелетких компонентів шляхом введення додаткового поправочного коефіцієнту.

Для експериментальної перевірки розрахованих коефіцієнтів тепловіддачі було створено лабораторну установку (рис. 10), основним елементом якої була скляна ємність 1. У нижній частині ємності розташований електричний нагрівач 3, а у верхній - трубчастий теплообмінник 2. У теплообмінник 2 насосом 6 подається холодна вода з водоохолоджувальної установки 5.

Коефіцієнт тепловіддачі визначався як відношення теплового потоку вихідного від одиниці поверхні електрообігрівача до рідини до різниці температур між поверхнею нагрівача і рідиною. Для визначення цієї різниці температур на поверхні нагрівача і в рідині розміщені термодари, підключені до вторинного перетворювача EDAM 5000, який по USB інтерфейсу передає значення температур на ЕОМ. Величина теплового потоку змінювалася за допомогою ЛАТР. Початок кипіння реєструвалося візуально і по стабілізації температури рідини. Установка дозволяє проводити експерименти як при атмосферному тиску так і при вакуумі. Інструментальна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі не перевищує 6 %.

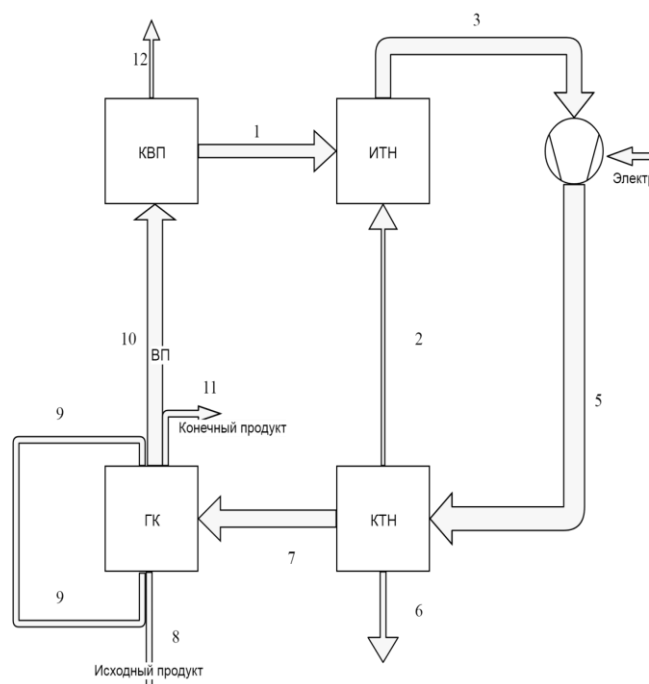


Рис. 9. Схема енергетичних потоків.

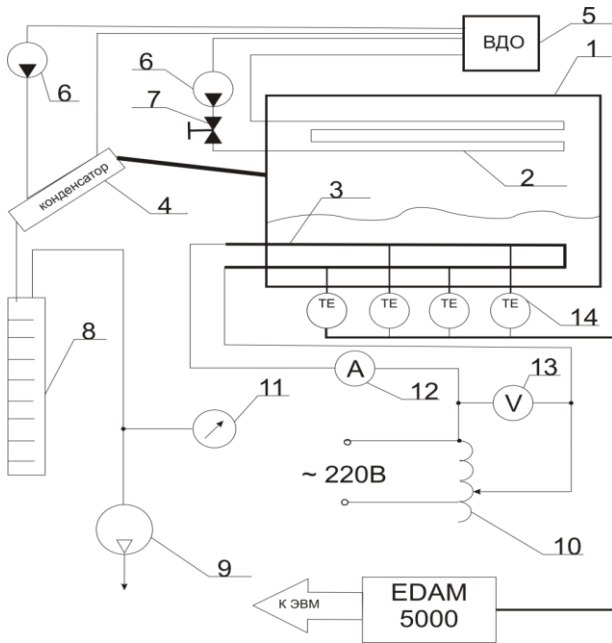


Рис. 10. Схема експериментальної установки. 1 – ємність, 2 – теплообмінник, 3 – електронагрівач, 4 – конденсатор, 5 – водоохолоджувальна установка, 6 – насос, 7 – вентиль, 8 – мірна ємність, 9 – вакуум-насос, 10 – ЛАТР, 11 – манометр, 12 – амперметр, 13 – вольтметр, 14 – термопар.

атмосферному тиску, представлені на рис. 11.

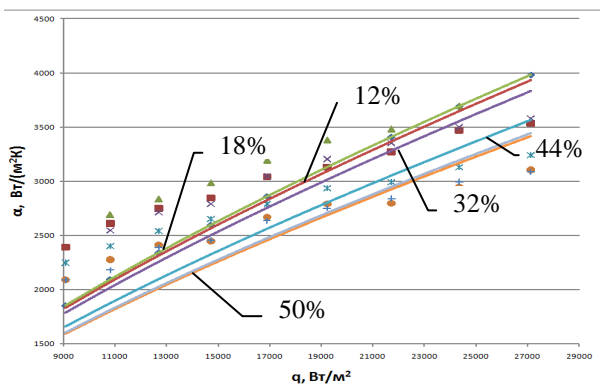


Рис. 11. Порівняння розрахункових і експериментальних залежностей коефіцієнта тепловіддачі від щільності теплового потоку при різних концентраціях соку.

Дослідним шляхом було отримано рівняння для визначення уточнених значень коефіцієнтів теплопередачі  $K_k = 29,5 \cdot q^{-0,34}$  (рис. 12), яке було використано при

Для дослідів використовувався яблучний сік з початковою концентрацією 12%. Після проведення вимірювання ентів тепловіддачі і температурної депресії даного соку, за допомогою тилля 7 перекривали подачу охолоджуючої води в теплообмінник 2, тим самим припиняючи конденсацію пари всередині ємності. Вторинний пар, конденсувався в конденсаторі 4 і збирався в мірну ємність 8. При досягненні наступного заданого значення концентрації соку вентиль 2 відкривався, і проводилися дослідження процесу кипіння соку наступної концентрації. Зміни проводилися в діапазоні концентрацій 12-50% і щільності теплового потоку 6 – 47 кВт/м<sup>2</sup>.

В результаті проведених досліджень отримали залежності коефіцієнта тепловіддачі від щільності теплового потоку і концентрації яблучного соку при

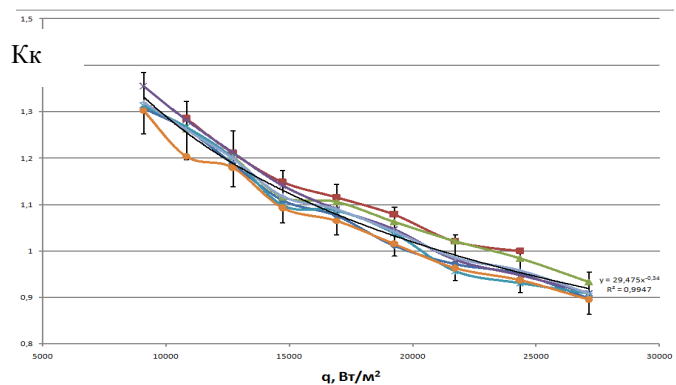


Рис. 12. Залежність коефіцієнта корекції  $K_k$  від щільності теплового потоку для концентрацій соку 12 – 50%.

техніко-економічній оптимізації ВВУ з двофазним контуром. В результаті оптимізації визначено температури випарника та конденсатора двофазного контуру, що забезпечують мінімальний термін окупності капітальних вкладень.

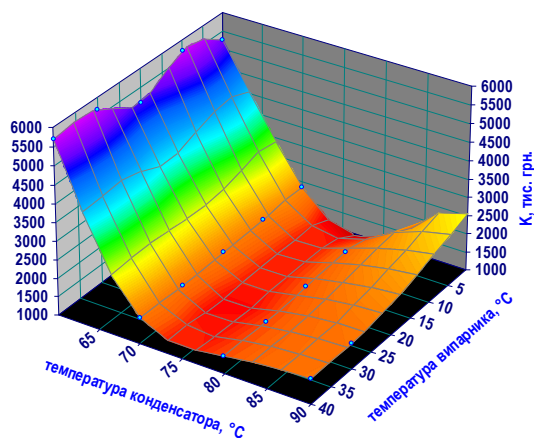


Рис. 13. Сумарне значення додаткових капітальних вкладень

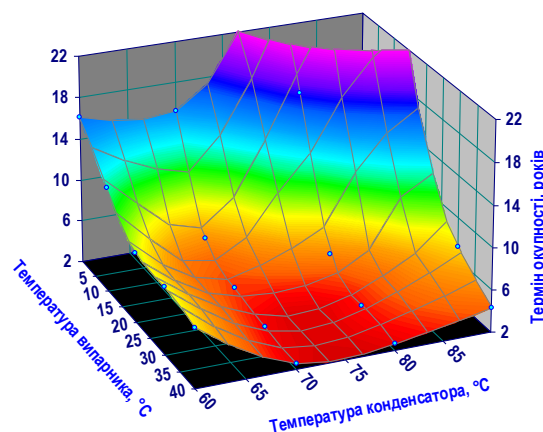


Рис. 14. Термін окупності додаткових капітальних вкладень

Для аналізу ефективності запропонованих рішень проведено розрахунки ефективності роботи обладнання для концентрування рідкого продукту (молоко, сік) від початкової концентрації 8,5 % до кінцевої концентрації 60 %, продуктивністю 1080 кг/год. За умови початкової температури продукту 20 °С, витрати теплоти на нагрівання продукту до температури кипіння становлять 36,96 кВт. Витрати теплоти на видалення розчинника становлять 617 кВт. З урахуванням втрат теплоти загальні витрати становлять 688 кВт. Вартість теплової енергії за цінами 2017 року складе 916 тис. грн. за рік.

При використанні системи термотрансформації з проміжним теплоносієм, додаткова електрична потужність компресора теплового насосу залежить від температури випарника та температури конденсатора. При використанні холодоагенту R134a у якості проміжного теплоносія в діапазоні температур конденсатора ТН 50 – 90 °С і випарника – 0 – 40 °С необхідна потужність компресора знаходиться в діапазоні 70 – 750 кВт.

Вочевидь, зменшення різниці температур між випарником та конденсатором призводить до зменшення експлуатаційних витрат, та призводить до зменшення потужності, а, відповідно, продуктивності і вартості компресора теплового насоса. Але це зменшення також приводить до зменшення різниці температур між теплоносіями в випарнику та конденсаторі і, відповідно, збільшення вартості додаткової теплообмінної поверхні. Враховуючи вартість компресора теплового насосу отримаємо сумарне значення додаткових капітальних вкладень (рис. 13). Враховуючи річне зменшення експлуатаційних витрат отримаємо що при температурі випарника 40 °С та температурі конденсатора 70 °С термін окупності системи складає 2,56 роки (рис. 14).

У цьому розділі «Розвиток техніки екстрагування з використанням принципів адресної доставки енергії» описані раніше ефекти перенесення речовини в середині капілярів під дією градієнту тиску, що виникає в результаті адресної доставки енергії МХ випромінюванням використовуються для удосконалення процесів екстрагування. Запропоновано проводити процес екстрагування в умовах адресної доставки енергії при режимах, що забезпечують режим конвективної дифузії. Вра-



Рис. 15. Загальний алгоритм розрахунку.

ховуючи теорію «бародифузії» проф. Бурдо та теорію адресної доставки енергії і модель тепломасообміну в капілярі, представлені в розділі 4, була розроблена методика розрахунку і оптимізації процесів екстрагування при адресній доставці енергії в умовах мікрохвильового поля, та реалізована комп'ютерна програма для розрахунку типових МХ екстракторів.

Головними незалежними вхідними параметрами були обрані: початковий стан екстрагента твердої фази і продуктивність апарату.

Для розрахунку необхідно задатися концентрацією екстрактивних речовин в твердому тілі і екстракті, температурою екстрагента і тиском в апараті.

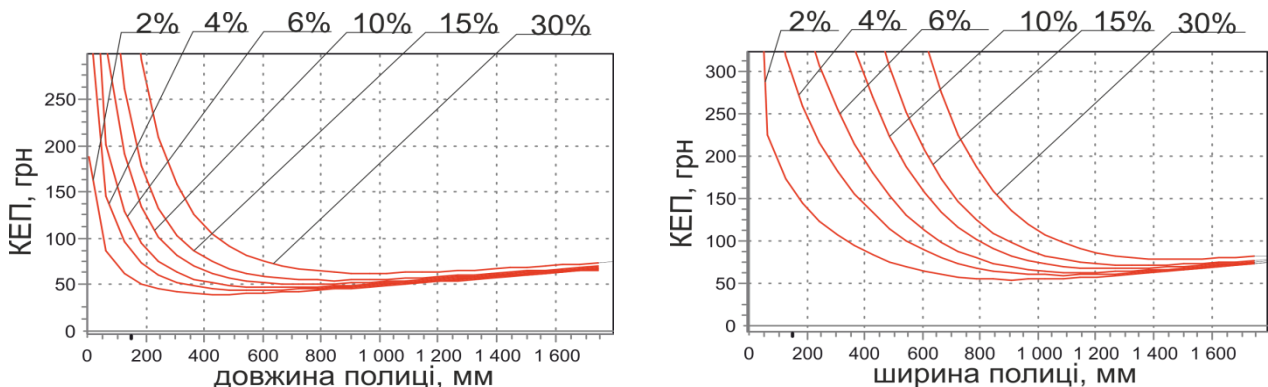


Рис. 16. Вплив конструктивних параметрів на КЕП екстрактора в залежності від концентрації екстрактивних речовин в сировині.

До числа основних факторів, що впливають на роботу екстрактора віднесені: термодинамічні фактори – константи фазової рівноваги, що визначають напрямок процесу; технологічні параметри проведення процесу, що впливають на швидкість і селективність всього процесу; гідродинамічні фактори, що характеризують міжфаз-

ну поверхню фаз; кінетичні та масообмінні фактори, що характеризують швидкість процесу і включають коефіцієнти масопередачі розчинних речовин.

Використовуючи розроблену програму було розраховано вплив конструктивних (рис. 16) та режимних параметрів (рис. 17) екстракційної установки для вилучення кави зі шламу на комплексний економічний показник (КЕП), що враховує вартість втраченого продукту, вартість витраченої електроенергії та амортизаційні витрати за годину роботи.

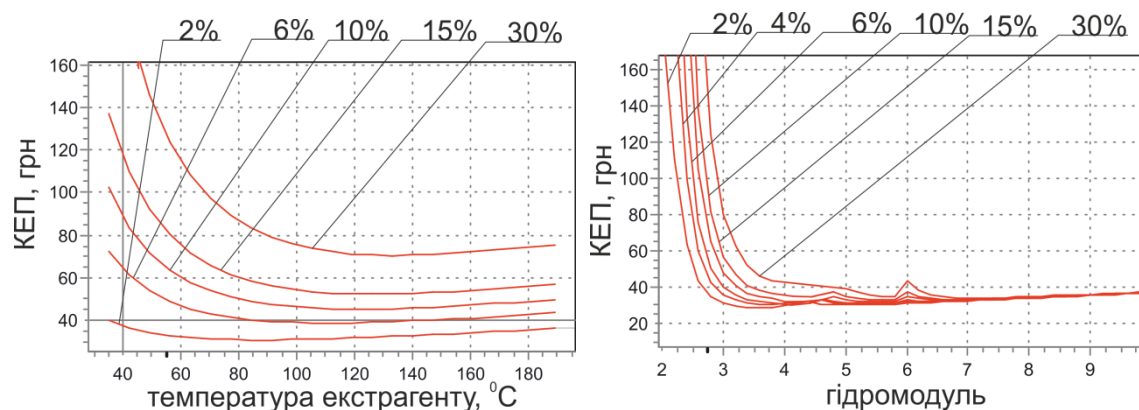


Рис. 17. Вплив режимних параметрів на КЕП екстрактора в залежності від концентрації екстрактивних речовин в сировині.

За допомогою методу по координатного спуску були визначені конструктивні параметри для виготовлення напівпромислової установки для екстрагування кави продуктивністю до 24 кг/год.

У **восьмому розділі** «Нові підходи до конструювання систем генерації теплової енергії» для генерації екологічно чистого сушильного агента та кондуктивного підігріву продукту в запропонованих раніше сушарках рекомендується використовувати теплогенератор з вакуумним двофазним випарно-конденсаційним контуром. Конструктивно блок теплогенератора являє собою зварений корпус, в якому розташований трубний пучок теплообмінника (трубчатка). У нижній частині корпусу розташована топкова камера, в хвостовій та боковій частині якої уварені вертикальні ребрені теплообмінні труби конвективного пучка і вихідний патрубок для відводу димових газів. Відпрацьовані гази з камери згоряння проходять через газовий тракт, в якому розташований конвективний пучок, і далі відводяться в газохід котельні і через димову трубу видаляються в атмосферу. Тепло продуктів згоряння передається проміжному теплоносію – воді, яка кипить під розрідженням. Теплогенератор при нагріванні води до 90 °С і нижче працює під вакуумом. Утворений при кипінні пар

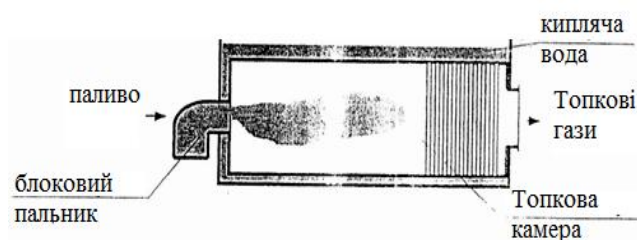


Рис. 18. Конструктивно-технологічна схема теплогенератора.

надходить в конденсаційні ділянки, де конденсується, віддаючи тепло конденсації повітрю або продукту. Утворений конденсат стікає назад в зону кипіння, таким ном, весь процес є замкнутим. Передбачається, що такі теплогенератори можуть довго і успішно працювати без системи водопідготовки, вони прості в технології і експлуатації, а також мають невелику вартість. До того ж такі теплогенератори забезпечують ізотермічність поверхні нагріву, що може бути важливо при термообробці термолабільних матеріалів. Конструктивно-технологічна схема теплогенератора представлена на рис. 19. Можливі різні варіанти конструктивного виконання парогенеруючого модуля.

Для розрахунку поля температур, тисків, швидкостей і масових витрат продуктів згоряння був використаний пакет FLUENT 6. На схемах показана права половина топки, ділянка з неоребренними трубами.

З розрахунків перенесення тепла для виробництва пари за конструктивною схемою в (рис. 19) стало зрозумілим, що через помітну нерівномірності в розподілі газових потоків в схемі с не вдасться досягти бажаних показників по економічності теплогенератора. І тому, вона навряд чи може вважатися перспективною. Рис. 20 наочно показує масштаби цих тепло-аеродинамічних нерівномірностей.

В результаті аналізу енерготехнологічних схем найбільш перспективні були вибрані для параметричної оптимізації.

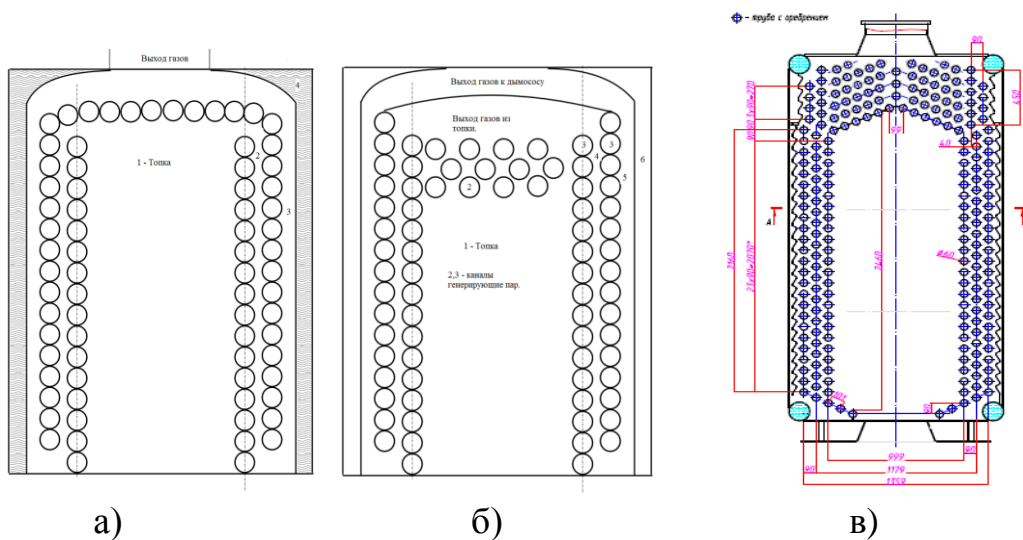


Рис. 19. Варіанти конструктивного виконання парогенеруючого модуля.

Конструктивні параметри, знайдені в процесі оптимізації, можуть бути близькі до гранично допустимих, а враховуючи що зрив циркуляції в трубах може бути критичним для цілісності теплогенератора, було проведено експериментальне дослідження впливу щільності теплового потоку на швидкість циркуляції та паровміст потоку для труб діаметром від 22 до 80 мм.

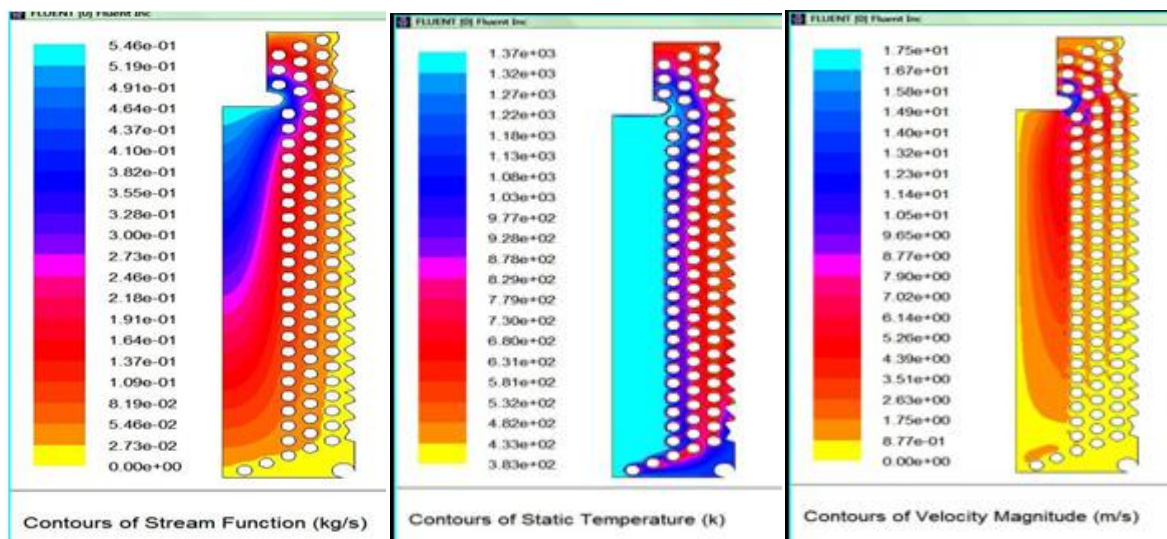


Рис. 20. Поля температур, швидкостей і масових витрат.

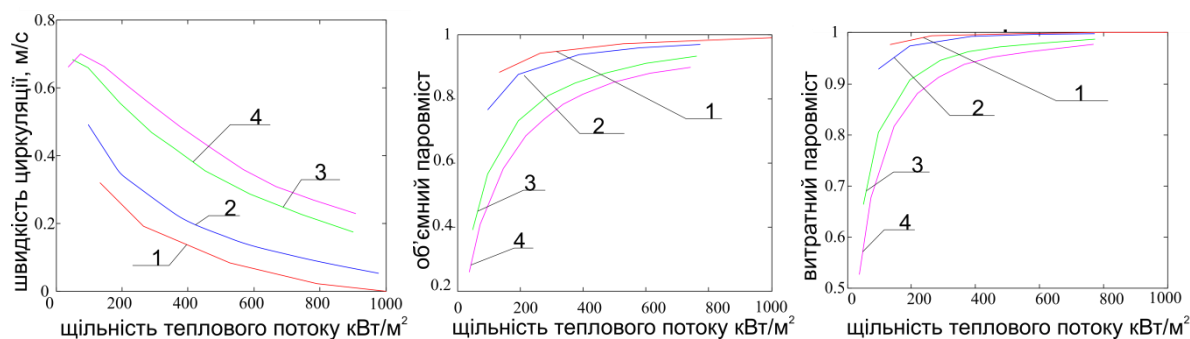


Рис. 21. Залежність швидкості циркуляції, об'ємного та витратного паровмісту від щільності теплового потоку ( $\text{кВт}/\text{м}^2$ ) через трубку діаметром 1 – 22 мм, 2 – 30 мм, 3 – 60 мм, 4 – 80 мм.

Експериментальні дослідження показали, що для заданої щільності теплового потоку мінімально допустимий діаметр підйомних труб, що забезпечує сталу циркуляцію рідкої фази в них є 60 мм.

Також для поліпшення масогабаритних показників були використані труби з нестандартним оребренням (рис. 22). Коефіцієнти тепловіддачі та аеродинамічного опору для таких труб також були визначені експериментально.

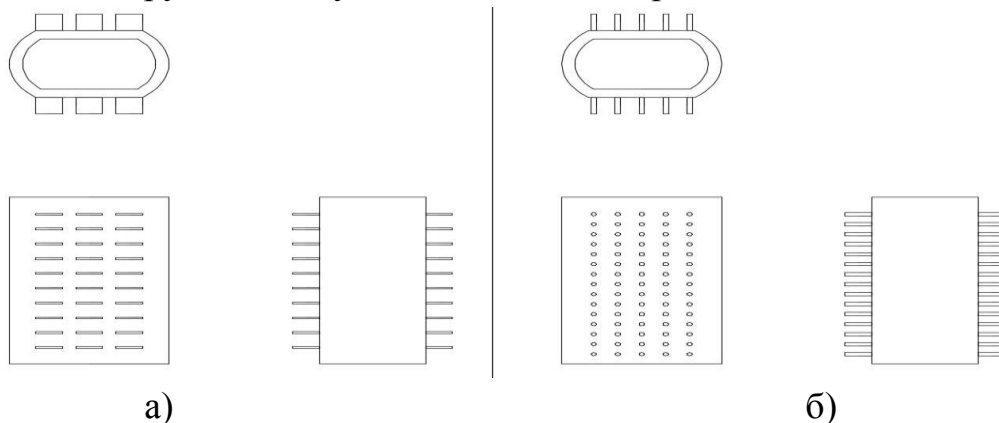


Рис. 22. Підйомна труба з плоским (а) та голчастим (б) оребренням.

Як видно з графіку (рис. 23) труби з плоскими ребрами мають кращі аеродинамічні характеристики ніж труби з голчастими. Голчасте оребрення, хоч і є більш ефективним з точки зору коефіцієнту теплопередачі, та плоске оребрення дозволяє досягнути більш розвиненої поверхні теплопередачі і може бути більш ефективним по масогабаритним показникам. Відмінність в показниках приведенного коефіцієнта тепловіддачі складає 12 –18 %. Враховуючи показники аеродинаміки плоске оребрення є більш перспективним за голчасте.

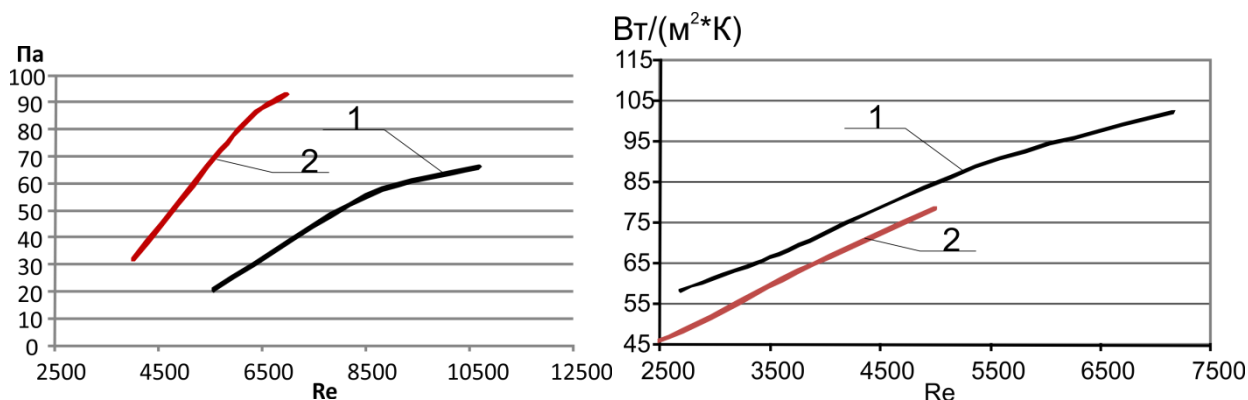


Рис. 23. Залежність аеродинамічного опору та приведенного коефіцієнта тепловіддачі від числа Рейнольдса для труби з плоскими (1) та голчастими (2) ребрами.

Проведено оціночні розрахунки теплогенератора потужністю 1 МВт, що представляє собою вертикальну водотрубну установку, яка містить по 42 підйомні труби овальної форми (30x80 мм) по обидва боки факела. Підйомні труби розташовані в два ряди, причому другий ряд труб зміщений на півкроку по відношенню до першого. Зазор між сусідніми трубами в кожному ряду становить 10 мм.

Розглянуті три випадки: перший випадок – труби мають гладку поверхню, другий випадок – поверхня труби має з плоского боку голчасту теплообмінну поверхню (приварені штирьові радіатори), третій випадок – поверхня труби з плоского боку має ребристу теплообмінну поверхню (містить приварені пластинчасті радіатори).

Довжина труби становить 570 мм, кожна труба містить (у другому випадку) по 385 штирі з кожного боку, сусідня труба також має 385 штирі, при цьому кожен зазор між трубами має по 770 штирі, розташованих в шаховому порядку по відношенню до газового потоку, а теплові потоки, відібрані штирями, розподіляються порівну між двома сусідніми трубами. Довжина штиря становить 10 мм, діаметр штиря – 2 мм. Самі штирі вироблені зі сталі, при розрахунках передбачалося, що місця контактів штирів до труби однорідні і не мають значних теплових опорів. Коефіцієнт ефективності штиря, що залежить від коефіцієнта тепловіддачі, матеріалу штиря і його форми, дорівнює 0,91. Омивана газами площа штирів для установки в цілому складає 4,06 м<sup>2</sup>. Наявність штирів звузило в два рази живий пе-

ретин для проходження продуктів горіння (з  $0,250 \text{ м}^2$  до  $0,125 \text{ м}^2$ ), що збільшило їх міжтрубному швидкість і величину теплост'єму.

Рєбриста (пласка) теплообмінна поверхня має по 572 ребра з кожного боку труби, при цьому знімання з радіаторів розподіляється порівну між сусідніми трубами. Самі ребра виконані зі сталі і приварені до труби попарно. Висота ребра становить 10 мм, товщина – 1мм, довжина – 6 мм. Коефіцієнт ефективності ребра становить 0,89. Омивана газами площа ребер для установки в цілому склала  $5,6 \text{ м}^2$ . Живий перетин для проходження продуктів згорання при наявності ребер є  $0,20 \text{ м}^2$ .

Таблиця 1

### Параметри теплогенератора із пластинчатою теплообмінною поверхнею

Ряд труб	Температура газу		Витрата газу	Швидкість газу
	на вході	на виході		
	$t^{\circ}\text{C}$	$t^{\circ}\text{C}$	$V \text{ м}^3/\text{с}$	$\omega \text{ м/с}$
1	1100	357	1,32	6,6
2	357	201	0,74	3,7
Ряд труб	Коефіц.тепл. конв.	Тепло к трубе		
		перед, ви- пром.	перед, конв.	загальне
	$\alpha \text{ Вт/м}^2\text{град}$	$Q, \text{ Вт}$	$Q, \text{ Вт}$	$Q, \text{ Вт}$
1	121	314145	433153	747298
2	80	-	57115	57115
				$Q_{\Sigma}=804413$

Розрахунки теплогенератора проводилися з умови витрати метану  $22 \text{ г/с}$ , загальна витрата продуктів згорання становила –  $G = 0,462 \text{ кг/с}$ , температура продуктів згорання на вході міжтрубного зазору першого ряду труб склала  $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результати розрахунку параметрів теплогенератора для випадку з гладкими теплообмінними поверхнями підйомних труб, з ребристими (пласкими) теплообмінними поверхнями труб представлені в таблиці 1.

У дев'ятому розділі «Інженерні методи розрахунку та оптимізації теплотехнологій» приведено алгоритми інженерних розрахунків теплогенераторів та приведено результати розрахунків теплогенераторів потужністю 2, 1,5 та 1 МВт. З'ясовано також вплив ширини каналу для продуктів згорання на їх температуру на виході та аеродинамічний опір. Вочевидь зменшення ширини каналу дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії парогенератора за рахунок зменшення втрат теплоти з продуктами згорання, що йдуть з теплогенератора. Але після певної величини ширини каналу спостерігається раптове зростання аеродинамічного опору (рис. 24). Також треба прийняти до уваги, що збільшення аеродинамічного опору призводить не тільки до зростання експлуатаційних витрат електричної енергії, що витрачають вентилятори на подолання цих опорів, але й до зростання капітальних витрат на придбання цих вентиляторів. Характерно, що залежність капітальних витрат від ае-

родинамічного опору носить також нелінійний характер, після певного тиску замість вентилятора низького тиску потрібно використовувати вентилятор середнього тиску, а, надалі, і високого тиску. Ціна ж між цими категоріями вентиляторів може відрізнятись на порядки. Тому є сенс при проведенні процедури оптимізації конструктивних параметрів теплогенераторів встановити обмеження по величині аеродинамічного опору.

Після проведеного аналізу був сформульований економічний критерій оптимальності як сумарні розрахункові витрати для різних співвідношень вагомості капітальних і експлуатаційних витрат. Параметрами оптимізації були конструктивні параметри труб:  $D$  – діаметри труб від 60мм-до 200мм;  $h$  – висота ребра 8 – 12мм;  $b$  – число рядів труб, розміщених в торці камери згоряння;  $c$  – ширина каналу;  $d(t)$  – крок витків 3 – 14мм; а також газоходу і трубного пучка:  $H1$  – висота труб (висота газоходу);  $H2$  – ширина трубного пучка (ширина газоходу);  $S2$  – продольний крок між трубами (приймався рівним діаметру);  $M$  – зазор між ребрами  $S1-D-h$  (або  $S1$  – поперечний крок між трубами).

В результаті проведення процедури оптимізації для різних вагових коефіцієнтів в загальному критерії було з'ясовано наступне: поступове звуження каналу не має істотного впливу на характеристики апарату; застосування плоского обрешення дозволяє знизити масу апарата, в порівнянні зі голковим; при певних умовах (при ваговому коефіцієнті вартості матеріалу, який дорівнює 0.85 і ваговому коефіцієнті вартості газу дорівнює 0,15) мав місце чіткий екстремум (мінімум сумарних розрахункових витрат (рис.25)). Для інших умов розрахунку визначено монотонне зниження критерію оптимальності при збільшенні числа рядів в торці камери згоряння, але при цьому не враховувалося, що з ростом цього параметра зростає інтенсивність тепловіддачі в топці і, як наслідок зростає щільність теплового потоку на найближчі ряди в торці камери, що може призводити до кризи. Тому слід було мати на увазі, що цього мінімуму відповідає певна кількість рядів парогенеруючих трубок в торці камери згоряння. При дослідженні впливу

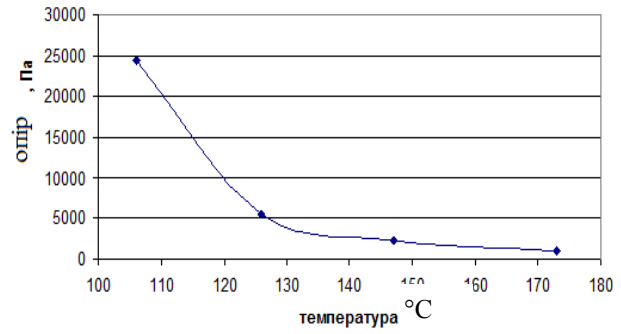


Рис. 24. Залежність опору від температури газів, що виходять.

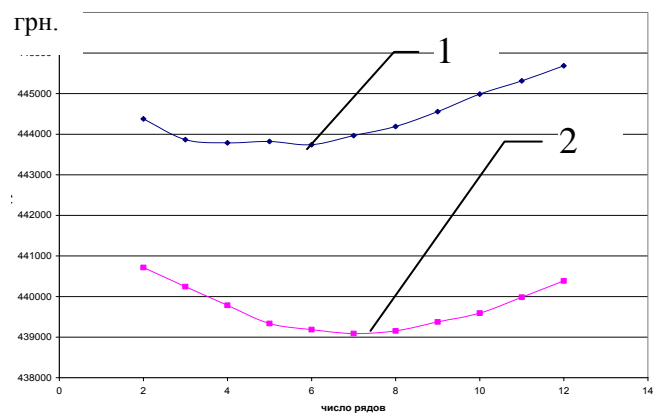


Рис. 25. Сумарні витрати від числа рядів труб в торці топки, для труб діаметром: 1 – 100мм, 2 – 80мм.

діаметра труб на масу трубного пучка встановлено, що залежність має мінімум, який досягається для даних умов при діаметрі 57мм. Крок оребрення і зазор між ребрами  $m = S1-D-h$  слід приймати мінімально можливим.

Враховуючи, що розроблений теплогенератор може бути використаний не тільки в сушарках а й інших промислових і побутових об'єктах було також проведено техніко-економічну оптимізацію масогабаритних показників конденсаційного теплообмінника на прикладі підготовки гарячої води. У якості критерія оптимізації було прийнято комплексний показник  $Z = g_1 \cdot \frac{M}{M_0} + g_2 \cdot \frac{V}{V_0}$  де  $M_0$  - маса трубного пучка

при деякому нульовому умови;  $V_0$  - його об'єм при цих же умовах;  $M$ ,  $V$  – маса і об'єм при поточних умовах;  $g_1$  і  $g_2$  оцінки важливості внеску кожного з параметрів в комплексний критерій оптимальності. Незалежними параметрами, що впливають на критерій прийняті: матеріал труб, діаметр і товщина стінки, наявність накатки, ширину трубного пучка. Аналіз проведених розрахунків дозволяє зробити висновок, що зміна матеріалу труби з міді на латунь практично не позначається на масі і об'ємі трубного пучка. Зменшення товщини стінки труби з 1мм до 0.8мм дозволяє знизити масу трубного пучка на 8% і об'єм на 11%. Застосування накатаних труб дозволяє знизити масу трубного пучка, проте призводить до збільшення його об'єму. Зменшення ширини трубного пучка призводить до зростання його маси і об'єму. Збільшення маси й об'єму трубного пучка при діаметрах труб менших 10мм для гладких труб і 15мм для накатаних пов'язано з необхідністю забезпечити заданий гідравлічний опір апарату.

У **десятому розділі** «Результати впровадження та оцінка економічної ефективності іноваційних рішень» приведено результати виробничих випробовувань іноваційної вакуумної сушарки з двофазним випарювально-конденсаційним контуром основні параметри якої наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

### Основні технічні характеристики вакуумної сушарки

Параметр	Значення
Потужність, споживана парогенератором, Вт	3000
Кількість полок і піддонів, шт	16
Загрузка піддону, кг	2 – 2,5
Тиск в сушильній камері, кПа	5 - 15
Температура сушіння, °С	40 - 90
Температура холодної води, °С	4 - 20

Результати промислових випробовувань іноваційної сушарки показали можливість використання розробленого обладнання для технології виробництва сушеного часнику та морепродуктів.

Доведено можливість організації процесу сушіння в вакуумі при сації водяної пари безпосередньо в обсязі сушильної камери. Доведено можливість теплопередачі до поверхні продукту за допомогою двофазного випарно-конденсаційного контуру. Термограми продукту, отримані за допомогою тепловізора, свідчать про незначне (в межах  $1^{\circ}\text{C}$ ) відхилення температур у всіх касетах. Рівень температур і інтенсивність виходу пари з сировини показують, що установка відповідає вимогам до інноваційних зразків енергоефективної техніки сушіння

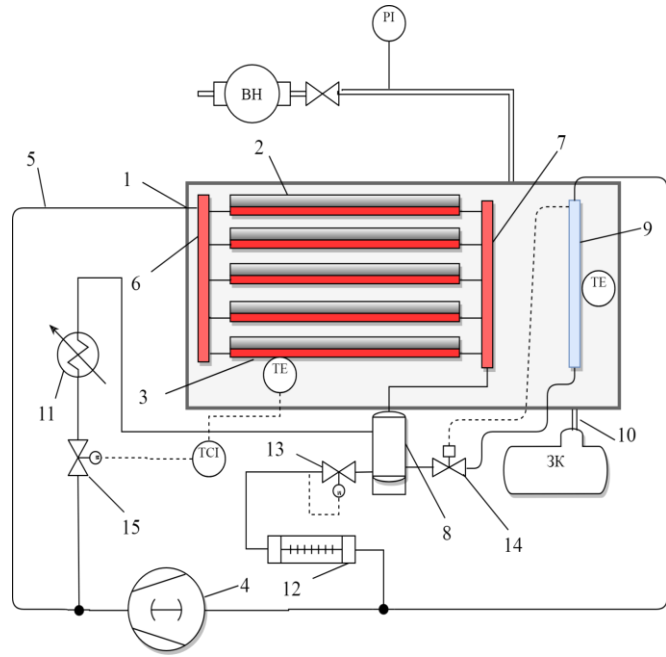


Рис. 26. Схема модифікованої вакуумної сушарки.

За результатами виробничих випробовувань було запропоновано проект енергоефективної вакуумної сушарки з термотрансформатором (рис. 26). На відміну від попередньої схеми, холодна поверхня 9 на якій відбувається конденсація пари, що утворюється під час сушіння, охолоджується за рахунок фазового переходу з рідкого до газоподібного стану холодильного агента R134a. Холодильний агент

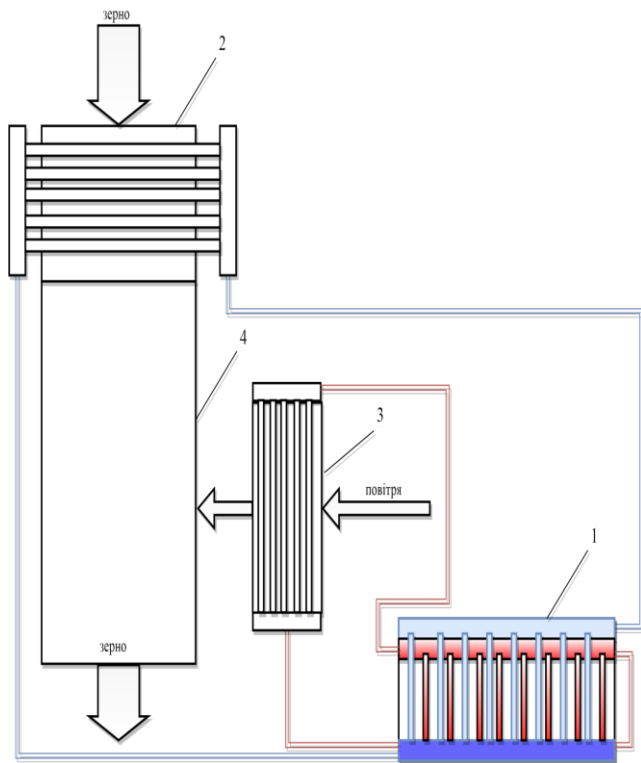


Рис. 27. Модифікована блочна сушарка.

стискається до тиску конденсації компресором 4. Конденсація холодильного агента відбувається в конденсаторі 3 і теплота конденсації передається продукту, що висушується. Температура охолоджуючої поверхні 9 підтримується за допомогою терморегулюючого вентиля 14. Коли температура полиць з продуктом досягає заданої, надлишок енергії видаляється в навколишнє середовище в додатковому конденсаторі 11. У випадку коли тиск всмоктування компресора зменшиться нижче заданого обмеження холодильний агент з ресивера 8 подається в додатковий випарник 12, де переходить в газову фазу і подається на вхід компресора 4. Тиск в лінії всмоктування контролюється за

допомогою регулятора тиску 13. Термін окупності запропонованої модифікації складе 1,16 років. Питомі витрати енергії складуть 1,19 МДж на кг видаленої вологи.

Також запропоновано проект модифікованої блочної зерносушарки продуктивністю 6 т/год., що ґрунтується на принципах адресної доставки енергії та використанні систем термотрансформації з двофазним контуром (рис. 27). Сушарка складається з двоконтурного теплогенератора 1, шарового підігрівача зерна 2, калорифера 3 та шахти 4. Тиск в першому контурі теплогенератора дорівнює 85 кПа, а тиск у другому контурі – 400 кПа. Підйомні труби другого контура утворюють топковий екран і сприймають теплоту безпосередньо від факела та гарячих топкових газів. Пара, що утворюється в підйомних трубах другого контуру, конденсується в калорифері 3. Труби першого контуру сприймають теплоту від топкових газів, що йдуть з топки (температура 900 – 1000 °С). Пара з підйомних труб першого контуру конденсується в трубах шарового підігрівача зерна при температурі 95 °С.

Описано створені прикладні програми для розрахунку і оптимізації обладнання для сушіння, екстрагування, та генерації теплоти. Пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання та оптимізації екстракторів при виробництві розчинної кави було впроваджено на Українсько-англійському спільному підприємстві «ГАЛКА Лтд» та на ПАТ «Енні Фудз». Розгляд пакету програм показав, що вони становлять інтерес для використання з метою обрання доцільних режимів роботи екстракторів.

В лабораторії ОНАХТ було проведено дослідження дослідно-промислового зразка екстракційної установки з адресною доставкою енергії. Отриманий в результаті досліджень екстракт був переданий для аналізу на ПАТ «Енні Фудз» і отримав позитивні оцінки по усім показникам якості.

## ВИСНОВКИ

В на підставі теоретичних та експериментальних досліджень в роботі науково обґрунтовано та доведено що використання принципів спрямованої доставки енергії до рідкої фази харчової сировини, дає можливість створення енергоефективних теплотехнологій та інноваційного тепломасообмінного обладнання. Повністю вирішені задачі теоретичних та експериментальних досліджень.

1. Проведене на основі аналізу енергетичної ситуації структурне моделювання енерготехнологій дозволило встановити що їх структурна недосконалість може бути джерелом втрат енергії. Виявлено протиріччя, що полягає в невідповідності потенціалу енергії, що утворюється при її генерації тепловим методом і необхідним потенціалом для її використання кінцевим споживачем в харчових виробництвах для розв'язання якого встановлюються додаткові ступені трансформації енергії. Рі-

шення виявлених протиріч слід шукати в покращенні систем трансформації енергії, використанні нових принципів доставки енергії.

2. Розроблені моделі градієнтних та безградієнтних систем адресної доставки енергії дозволили розширити уявлення про процеси тепло масообміну в капілярних структурах і дисперсних середовищах, та лягли в основу методик розрахунку удосконалених теплотехнологій, а саме:

- модель адресної доставки енергії всередину капілярно-пористого твердого тіла з урахуванням можливих локальних перегрівів рідини в капілярах, що призводять до точкового її переходу в парову фазу з ініціацією специфічного гідродинамічного двофазного потоку з капіляра в напрямку його відкритого торця, потужність якого визначається співвідношенням сил інерції потоку і сил «капілярного гальмування»

- модель процесу сушіння шару дисперсної сировини при градієнтній адресній доставці енергії за допомогою АТПП з урахуванням ефекту «капілярного гальмування»

- методики розрахунку і оптимізації процесів екстрагування в умовах адресної мікрохвильової доставки енергії.

- методики розрахунку і оптимізації процесів концентрування розчинів в випарних установках з системами термотрансформації на основі теплових насосів.

3. Для уточнення розроблених моделей було розроблено експериментальні установки і проведені дослідження процесів тепло та масообміну при:

- кипінні розчинів харчових продуктів. Запропоновано уточнену залежність для визначення коефіцієнтів тепловіддачі для яблучного соку концентрацією 10 – 50%.

- сушінні продукту в вакуумній сушарці. Запропоновані рівняння для визначення тривалості сушіння морепродуктів та овочевої сировини.

- кипінні рідини в теплообмінних трубах. Перевірено забезпечення сталої циркуляції при кипінні рідини в трубах діаметром від 60 мм при щільності теплового потоку до  $800 \text{ кВт/м}^2$ .

- взаємодії від газового потоку з оребреними трубами зі специфічними видами оребрення. Визначено відповідні коефіцієнти тепловіддачі та аеродинамічного опору в діапазоні  $Re$  від  $10^3$  до  $10^4$ .

4. Розроблено інженерні методи і комп'ютерну програму розрахунку обладнання для сушіння дисперсних матеріалів з використанням градієнтних методів адресної доставки енергії за допомогою термосифонів. Створено програму розрахунку вакуумної сушарки та випарної установки удосконалених системами термотрансформації на основі теплового насосу випарник якого знаходиться безпосередньо в камері з продуктом, що дозволяє зменшувати опір лінії відводу і час роботи вакуум насосу. Розроблено методики і створено комп'ютерні програми для

розрахунку і оптимізації теплогенеруючого обладнання з замкнутим випарно-конденсаційним циклом.

Створено програму розрахунку екстракторів з безградієнтною доставкою енергії за рахунок МХ випромінювання. Пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання та оптимізації екстракторів при виробництві розчинної кави було впроваджено на Українсько-англійському спільному підприємстві «ГАЛКА Лтд» та на ПАТ «Енни Фудз». Розгляд пакету програм показав, що вони становлять інтерес для обрання доцільних режимів роботи екстракторів.

5. Проведено серію дослідів з комп'ютерного моделювання та визначено:

– кінетику сушіння шару сипкого матеріалу в умовах підведення енергії за допомогою АТПП з урахуванням ефекту «капілярного гальмування»;

– конструктивні та режимні параметри екстракційного обладнання з адресною доставкою енергії продуктивністю по кавомісткій сировині від 6 до 96 т/год;

– конструктивні та режимні параметри теплогенератора, шарового підігрівача та калорифера модифікованої блочної зерносушарки продуктивністю 6 т/год, що забезпечують витрати природного газу 37,6 м<sup>3</sup>/год., або 5,68 м<sup>3</sup>/т;

– для запропонованої випарної установки з тепловим насосом оптимальною є температура гріючої пари 57 °С при 7500 годинах роботи ВВУ на рік. У разі 750 годин роботи в році, ця температура становить 60 °С.

6. Результати промислових випробовувань інноваційної сушарки показали можливість використання розробленого обладнання для технології виробництва сушеного часнику та морепродуктів. Доведено можливість організації процесу сушіння в вакуумі при конденсації водяної пари безпосередньо в обсязі сушильної камери. Доведено можливість теплопередачі до поверхні продукту за допомогою двофазного випарно-конденсаційного контуру. Термограми продукту, отримані шляхом тепловізійної зйомки, свідчать про незначне (в межах 1<sup>0</sup>С) відхилення температур у всіх касетах. Рівень температур і інтенсивність виходу пари з сировини показують, що установка відповідає вимогам до інноваційних зразків енергоефективної техніки сушіння. Впровадження системи термотрансформації в вакуумну сушарку дозволить привести питомі витрати енергії до 1,19 МДж на кг видаленої вологи Термін окупності запропонованої системи складе 1,16 років.

Створена пілотна установка з термотрансформацією для концентрування розчинів. Продуктивність установки по сировині при збільшенні концентрації від 12% до 60% складає 1,9 кг/год. Питомі витрати енергії складають 0.5 МДж на кілограм випареної води або 1,9 МДж на кілограм концентрованого продукту.

Проведені в лабораторії ОНАХТ дослідження дослідно-промислового зразка екстракційної установки з адресною доставкою енергії і наступний аналіз продукту в лабораторії ПАТ «Енни Фудз» показали, що отриманий екстракт відповідає усім показникам якості.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Монографії*

1. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб / Бурдо О. Г. та ін. Одесса: «ИНВАЦ». 2014. 376 с. *(здобувачем у співавторстві написано глави 1 - 10).*
2. Сучасний стан галузей економіки України: проблеми та шляхи вирішення: моногр. / за ред. І. І. Савенко, І. О. Седікової. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 433 с. *(здобувачем у співавторстві написано главу 4).*

*Статті у закордонних виданнях та у фахових українських виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах.*

3. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / Burdo O. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 11 (88). Issue 4. P. 34–42. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
4. Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer / Burdo O. et al. // EUREKA Phys. Eng. 2018. Vol. 4. Issue 4. P. 18–24. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
5. The technologies of targeted energy supply in food industry / Burdo O. et al. // MOTROL. Com. Mot. Energ. Agric. 2016. Vol. 18. Issue 8. P. 7–14. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
6. Бурдо О. Г., Зыков, А. В., Ризниченко П. Н. Технологии адресной доставки энергии и термотрансформации при производстве продуктов питания // Probleme energeticii regionale. 2016. № 2 (31). С. 55–68. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
7. The Nanotechnological Innovation in Food Industry / Burdo O. et al. // Int. J. Eng. Res. Appl. (IJERA), ISSN 2248-9622. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 144–150. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
8. Zыkov A. V., Riznichenko D. N., Bezbah I. V. Experimental studies of boiling heat transfer of food solutions // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. Т. 81, вип. 1. С. 85–90. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
9. Терзієв С. Г., Левтринська Ю. О., Зиков О. В. Математичне моделювання та оптимізація мікрохвильового протитечійного екстрактора // Наук.пр. /Одес. нац.

- акад. харч. технологій. 2017. Т. 81, вип. 1. С. 157–163. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
10. Smirnov H. F., Zykov A. V., Riznichenko D. N. The determinaton of energy source optimal parameters for vacuum evaporation // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2016. Т. 80. вип 1. С. 133–137. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

### **Статті у фахових виданнях України**

11. Zykov A., Bezbah I., Osadchuk P. Modeling of grain drying process by rotation thermosyphon // Аграрний вісник причорномор'я. 2017. №. 85. С. 100–111. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
12. Терзиев С. Г., Левтринска Ю. О., Зиков О. В. Оптимізація поточних мікрохвильових екстракторів кави // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. Т. 98. вип 3. С. 106–111. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
13. Смирнов Г. Ф., Зиков, О. В. Проблема выбора лучшего технического решения для обеспечения вакуум выпарной установки подводом тепла // Промышленная теплотехника. 2016. Т. 38. вип. 5. С. 32–39. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
14. Зыков А. В. Совершенствование теплотехнологий АПК на основе систем термотрансформации и адресной доставки энергии // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2014. Т. 3. вип. 45. С. 220–223. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
15. Бурдо О. Г., Безбах І. В., Зиков О. В. Дослідження процесу сушіння в рекуперативній зерносушарці // Зерновые продукты и комбикорма. 2014. Т. 3. Вип. 55. С. 47–50. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
16. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Анализ процесса сушки недеформируемого, нагреваемого материала на основе представлений о существовании физических механизмов ее торможения // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2014. Т. 2. вип. 45. С. 214–221. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
17. Бурдо О. Г., Безбах І. В., Зиков О. В. Підвищення енергоефективності рекуперативної зерносушарки // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2014. Т. 2. вип. 45. С. 190–195. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

18. Нові конструкції сушарок для виробництва екологічно безпечних зернопродуктів при зменшенні витрат енергії / Бурдо О. Г. та ін. // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2012. Т. 1. вип. 41. С. 231–235. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
19. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В., Воскресенская Е. В. Обобщение экспериментальных данных сушки амаранта, тепловая модель процесса сушки // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2012. Т. 1. вип. 41. С. 133–137. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
20. Зыков О. В., Воскресенська О. В. Моделирование процесса сушіння амаранту в апараті з термосифоном, що обертається // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. 2011. Т. 13. вип. 4 (50). С. 58–62. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
21. Зыков А. В., Воскресенская Е. В. Моделирование процесса сушки амаранта // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2011. Т. 2. вип. 39. С. 355–358. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
22. Бурдо О. Г., Зыков А. В., Светличный П. И. Стратегия совершенствования энерготехнологий в условиях кризиса // Інтегровані технології та енергозбереження. 2009. Вип. 3. С. 3–10. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
23. Дослідження тепло-масообміну під час обробки дисперсних і в'язких харчових продуктів у апаратах на базі термосифонів / Бурдо О. Г та ін. // Обладнання та технології харчових виробництв тематичний збірник наукових праць. 2009. Вип. 22. С. 28–34. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
24. Бурдо О. Г., Безбах І. В., Зыков А. В. Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья // Інтегровані технології та енергозбереження. 2008. №. 2. С. 23–28. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
25. Развитие конструкций тепло- массообменных аппаратов на базе автономных двухфазных модулей / Безбах И. В. та ін. // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2008. №. 32. С. 221–230. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
26. Зыков А. В. Проблемы моделирования процессов сушки // Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій. 2007. Т. 1. вип. 30. С. 122–126. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
27. Бурдо О. Г., Зыков О. В., Казьмірук Ю. О. Дослідження процесів мікро- і макроперенесення при сушінні в електромагнітному полі // Наук.пр. /Одес. нац. акад.

- харч. технологій. 2007. Т. 1. вип. 30. С. 169–172. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
28. Бурдо О. Г., Зиков О. В., Донкоглов В. І. Невтішний виходить моніторинг енергозатрат на зернопереробних підприємствах України // *Зерно і хліб*. 2006. № 3. С. 46–48. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
29. Бурдо О. Г., Зиков О. В., Воскресенська О. В. Енергоекономні схеми екологічно безпечних блочних зерносушарок // *Зерно і хліб*. 2005. № 4. С. 18–19. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

### ***Статті в інших виданнях***

30. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Моделирование процессов сушки на основе механизма капиллярного торможения // *Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій*. 2015. Т. 1. вип. 47. С. 73–78. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
31. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В., Резниченко Д. Н. Системный анализ энергоэффективности ВВУ с тепловым насосом // *Наук.пр. /Одес. нац. акад. харч. технологій*. 2015. Т. 2. вип. 47. С. 168–172. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

### ***Патенти***

32. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів: пат. на корисну модель 97592 Україна: МПК F26B 17/10 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u201410150; заявл. 15.09.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6.
33. Пристрій для нагрівання дисперсних матеріалів: пат. на корисну модель 97593 Україна: МПК F26B 17/10 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Кондратенко О.А., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u201410151; заявл. 15.09.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6.
34. Пристрій для нагрівання харчових рідин: пат. на корисну модель 107734 Україна: 42 МПК F24H 9/00 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u2015 11447; заявл. 20.11.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
35. Пристрій для сушіння харчових дисперсних продуктів: пат. на корисну модель 107735 Україна: МПК F26B 3/00, F26B 17/00 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u2015 11448; заявл. 20.11.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

36. Пристрій для випарювання харчових рідин: пат. на корисну модель 107736 Україна, МПК F26B 17/18 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u2015 11449; заявл. 20.11.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

### *Матеріали конференцій*

37. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Механизмы «капиллярного торможения» в процессах сушки // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 2013 года: тезисы доклада / Минск, 2016. Т. 3. С. 202–206. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
38. Burdo O. G., Smirnov G. F., Zykov A.V. The problem of research and determination of reliable characteristics of heat pipes and heat pipe heat exchangers life time // Second Int. Conf. "Heat Pipes Sp. Appl. (2HPSA), Moscow, 15-19 September, 2013: report theses / Moscow, 2014. С. 1–8. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
39. Зыков А. В. Методы моделирования процессов сушки // Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств, 2007: тезисы доклада, ХДУХТ. / Харків, 2007. С. 55–59. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
40. Зыков А. В., Орлова С. С. Энергоэффективные методы термической обработки зерна // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: Материалы Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (МНТК Плановский - 2016), Москва, 8-9 сентября, 2016 года: тезисы доклада, М:ФГБОУ ВО МГУДТ. / Москва, 2016. Т. 1. С. 154–157. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
41. Зыков А. В., Смирнов Г. Ф., Ризниченко Д. Н. Сравнение эффективности применения различных систем термотрансформации для снижения энергозатрат при концентрировании растворов в выпарных аппаратах // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: Материалы Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (МНТК Плановский - 2016), Москва, 8-9 сентября, 2016 года: тезисы доклада, М:ФГБОУ ВО МГУДТ. / Москва, 2016. Т1. С. 123–127. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

42. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Модель формування «капілярного механізму гальмування» процесу сушіння зернового шару // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ, Харків, 29 жовтня, 2015 року: тези доповіді, Х:ХДУХТ. / Харків, 2015. С. 15 – 16. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
43. Smirnov G. F., Zikov A. V. The new approach to the drying processes modeling with respect of some deceleration mechanisms actions // Heat pipes, heat pumps, refrigerators, and power sources: Proceedings of the IX Minsk International Seminar Held in Minsk, Minsk, 7-10 September, 2015: report theses. / Belarus, Minsk 2015. Vol.1. P. 220–228. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
44. Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Теоретический анализ процессов сушки и его приложение к сушке слоя зерна с кондуктивным энергоподводом // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А. В. Лыкова, Курск, 22-23 сентября, 2015 года: тезисы доклада, Издательство: Закрытое акционерное общество "Университетская книга". / Курск, 2015. С. 112–119. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
45. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Зыков А. В. Новые конструкции сушилок для производства экологически безопасных зернопродуктов при уменьшении удельных затрат энергии // Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудов (секционные доклады), Иваново, 23-26 сентября, 2014 года / Иван.гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2014. С. 339–344. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
46. Зыков О. В., Воскресенська О. В. Розробка математичної моделі сушильної системи з термомеханічним агрегатом // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф., Харків, 3-4 листопада, 2011 року. / ХДУХТ. Харків, 2011. С. 35. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*
47. Бурдо О. Г., Безбах И. В., Зыков А. В. Моделирование процесса сушки в блочной зерносушилке // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011: Материалы третьей междунар. науч. – практ. конф., Москва, 20-23 сентября, 2011 г. / Мо-

сква, 2011. Т. 1. С. 224–228. (*Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

## АНОТАЦІЯ

**Зиков О. В. Удосконалення теплотехнологій харчових виробництв на основі систем термотрансформації, теплоутилізації та принципів адресної доставки енергії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук (доктора наук) за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню теплотехнологій АПК на базі електромагнітних генераторів, теплових труб, термотрансформаторів із використанням ефекту адресної доставки енергії. В роботі науково обґрунтовано що використання принципів спрямованої доставки енергії до рідкої фази харчової сировини, дає можливість управляти потоками енергії і організувати локальний перегрів рідини, точково перевести її в парову фазу, що викликає зростання тиску в цій точці, і ініціює специфічний гідродинамічний двофазний потік з капіляра в напрямку його відкритого торця. Потужність такого гідродинамічного потоку визначається співвідношенням сил інерції потоку і сил «капілярного гальмування». В роботі вперше отримано залежності для визначення швидкості перенесення рідини в капілярі за рахунок «механодифузії» в умовах адресної доставки енергії з урахуванням «капілярного гальмування», безрозмірний критерій для визначення наявності «механодифузійного» ефекту та запропоновано і науково обґрунтовано методику визначення показників ефективності тепломасообмінного обладнання. У роботі розвинуто основи теорії тепломасопереносу та розширено уявлення і отримані структури рівнянь для розрахунку: процесів тепломасообміну в капілярних структурах, тепловіддачі при кипінні розчинів твердих нелетких компонентів, тепловіддачі оребрених поверхонь зі специфічним типом оребрення, часу сушіння продуктів в вакуумній сушарці.

**Ключові слова:** тепломасообмін, енергоефективність, сушіння, концентрування, екстрагування, теплогенератор, моделювання.

## АННОТАЦИЯ

**Зыков А. В. Совершенствование теплотехнологий пищевых производств на основе систем термотрансформации, теплоутилизации и принципов адрес-**

**ной доставки энергии. - Квалификационный научный труд на правах си.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (доктора наук) по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2018.

Диссертация посвящена усовершенствованию теплотехнологий АПК на базе электромагнитных генераторов, тепловых труб, термотрансформаторов с эффектом адресной доставки энергии. В работе научно обосновано, что использование принципов направленной доставки энергии в жидкой фазе пищевого сырья, дает возможность управлять потоками энергии и организовать локальный перегрев жидкости, точно перевести ее в паровую фазу, вызывает рост давления в этой точке, и инициирует специфический гидродинамический двухфазный поток из капилляра в направлении его открытого торца. Мощность такого гидродинамического потока определяется соотношением сил инерции потока и сил «капиллярного торможения». В работе впервые получены зависимости для определения скорости переноса жидкости в капилляре за счет «механо диффузии» в условиях адресной доставки энергии на базе «капиллярного торможения», безразмерный критерий для определения наличия «механо диффузионного» эффекта и предложена и научно обоснована методика определения показателей эффективности теплообменного оборудования. В работе развиты основы теории теплопереноса и расширено представление и получены структуры уравнений для расчета: процессов теплообмена в капиллярных структурах, теплоотдачи при кипении растворов твердых нелетучих компонентов, теплоотдачи ребренных поверхностей со специфическим типом ребрения, времени сушки продуктов в вакуумной сушилке.

**Ключевые слова:** теплообмен, энергоэффективность, сушки, концентрирования, извлечения, теплогенератор, моделирование.

**ABSTRACT**

***Zykov A.V. The improvement of heat technologies of food production based on thermal transformation systems, heat recovery, and the principles of targeted delivery of energy. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.***

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences (Doctor of Sciences) for specialty 05.18.12 – Processes and Equipment for Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

The thesis is devoted to the improvement of heat technologies of agroindustrial complex on the basis of electromagnetic generators, heat pipes, and thermal transformation systems using the effect of targeted energy delivery.

With the help of system analysis, it was found that the main contradiction in the production of thermal energy is the discrepancy of the potential of energy generated during its generation by the thermal method and the necessary potential for its use by the end user in food production. The solution to this contradiction requires the establishment of additional stages of energy transformation. But according to the requirements of modern times, the synthesis of eco-industrial technology should be based on the innovative principles of organization of transport processes which include: principles of targeted energy.

In the work it is scientifically proved that the use of the principles of directed energy delivery to the liquid phase of food raw materials enables to control the flows of energy and organize the local overheating of the liquid, transfer it to the vapor phase, which causes the increase of pressure at this point, and initiates a specific hydrodynamic two-phase flow from the capillary in the direction of its open end. The power of such a hydrodynamic flow is determined by the ratio of the forces of inertia of the flow and the forces of "capillary deceleration". In the work for the first time dependences for determining the rate of transfer of liquid in the capillary due to "mechano-diffusion" in the conditions of targeted energy delivery, taking into account "capillary inhibition", the dimensionless criterion for determining the presence of "mechano-diffusion" effect were obtained and the methodology for determining the efficiency of heat and mass exchange equipment was proposed and scientifically substantiated. In this work the basics of the theory of heat and mass transfer have been developed and the concepts of the equations for the calculation heat and mass transfer processes in capillary structures, heat transfer at boiling solutions of solid non-volatile components, heat transfer of finely-grounded surfaces with a specific type of fineness, and drying time of products in a vacuum dryer have been developed.

Thermo-transformation systems based on the two-phase vapor-condensation circuit can also increase the energy efficiency of the processes of concentrating food solutions in VEU. Using the diagram of energy flows, the value of the energy required for the process was clearly estimated. But the approach to this value requires the necessary regime and design parameters. The developed program for the calculation of such parameters required the updated values of the coefficients of heat transfer during boiling solutions of non-volatile components. An equation for the determination of the specified values of the heat transfer coefficients that was used in the technical and economic optimization of the two-phase circuit was obtained by the experimental way. As a result of optimization the temperatures of the evaporator and the capacitor of the two-phase circuit which provide a minimum payback period of capital investments were determined.

The previously described effects of mass transfer in the capillaries under the influence of the pressure gradient resulting from the targeted delivery of energy by microwave

radiation can be used to improve the extraction processes. It is proposed to carry out the extraction process in the conditions of targeted energy delivery at modes that provide a convective diffusion. Taking into account the theory of "barodiffusion" prof. Burdo a method for calculating and optimizing the extraction processes with targeted energy delivery in a microwave field was developed, and a computer program for calculating typical microwave extractors was implemented.

To generate an environmentally friendly drying agent and for conductive heating of the product in the previously proposed dryers, the use of the vacuum heat generator with the two-phase evaporative-condensation circuit is proposed. Various variants of constructive performance of the steam generating module are possible. As a result of the analysis of energy technology schemes, the most promising ones were chosen for parametric optimization. The optimum constructive parameters can be close to the maximum allowable, and given that the failure of circulation in the pipes may be critical for the integrity of the heat generator, an experimental study was carried out on the effect of the heat flux density on the circulation velocity and the particle flow volume. Also, pipes with non-standard fins were used to improve the weight and dimensions. The coefficients of heat transfer and aerodynamic resistance for such pipes were also determined experimentally.

For the parametric optimization of the heat generator, a complex dimensionless criterion that takes into account the metal capacity of the structure, energy efficiency and aerodynamic resistance has been proposed. As a result of optimization, constructive parameters of heat generators with capacity of 1, 1.5 and 2 MW were determined.

The final stage of the research was the introduction of developed applications for the calculation of microwave extractors in the companies «GALKA Ltd» and «Annie Foods», and the production tests of the created innovative vacuum dryer with a system of thermoformation on the Ukrainian garlic company «Agropatryot» and FOP «Dubovenko».

**Key words:** heat and mass transfer, energy efficiency, drying, concentration, extraction, heat generator, modeling.



Підписано до друку 5.11.2018 р. Формат 60×84/16  
Папір офсетний. Друк різнографічний  
Умов. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. 124

---

Видавничий центр ОНАХТ, 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112