

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



**ТЕРЗИЄВ Сергій Георгійович**

УДК 664.87.036.021.3/.4

**ІНОВАЦІЙНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОКОНЦЕНТРАТНИХ ВИРОБНИЦТВ НА ОСНОВІ  
СИСТЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ  
ТА КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси и обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня**

**доктора технічних наук**

Одеса 2016

дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій

Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор

**Бурдо Олег Григорович**

Одеська національна академія харчових технологій,  
завідувач кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор

**Михайлов Валерій Михайлович**

Харківський державний університет харчування та торгівлі,  
Міністерства освіти і науки України, проректор з наукової роботи, кафедра процесів, апаратів та автоматизації харчових виробництв;

– доктор технічних наук, професор

**Зав'ялов Володимир Леонідович**

Національний університет харчових технологій

Міністерства освіти і науки України м. Київ,

професор, завідувач кафедри процесів і апаратів харчових виробництв;

– доктор технічних наук, професор

**Паламарчук Ігор Павлович**

Вінницький національний аграрний університет, Міністерства освіти і науки України м. Вінниця, завідувач кафедри «Процеси та обладнання переробних і харчових виробництв ім. проф. П.С. Берніка».

Захист відбудеться *3 листопада 2016 р. о 10<sup>30</sup>* годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій, за адресою: ауд. А-234, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039.

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

Автореферат розісланий *29 вересня 2016 року*.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент



Г.І. Палвашова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Промислове виробництво харчових концентратів (ХК) почалося на початку першої світової війни. На території нашої країни підприємства, що випускають ХК, з'явилися в 1936 р. Специфіка продукції, її орієнтація на потреби армії й флоту визначили вимоги до ХК: швидкість приготування, тривалі строки зберігання й висока якість. Саме ці якості ХК викликають інтерес широкого кола споживачів, і зараз більшість жителів планети все частіше звертаються до таких продуктів. Швидко розширюється асортимент ХК та їхні ринки. Найзатребуванішим продуктом ХК у світі стала розчинна кава. Кількість працівників кавової індустрії на планеті досягла 25 млн. чоловік.

В останні роки в Україні стрімко росте продаж розчинної кави. Конкурувати з провідними виробниками кавопродуктів українським підприємствам складно: дорога імпортна сировина, ціни на енергоносії, які вирости до світового рівня. Традиційні технології ключових операцій виробництва - екстрагування і сушіння - відрізняються високою енергоємністю. Тому в роботі пропонуються інноваційні теплотехнології сушіння й екстрагування та інноваційні технології глибокої переробки сировини, переведення виробництва на принципи екоіндустрії. Комплексом аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень доведено справедливості висунутих гіпотез, про те, що, принципи адресної доставки енергії ефективні, як інструмент удосконалення, при переробці харчової сировини. В таких системах досягається інтенсифікація процесів переносу в кілька разів а, іноді, і на порядки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, що подаються, виконувалися відповідно до Державного плану економічного й соціального розвитку України (шифр 11ГЗН «Удосконалення термотехнологій сушіння харчових продуктів на основі автономних випарно-конденсаційних модулів»), у межах науково-технічної програми «Розвиток енергетики та енергозбереження в харчовій промисловості України до 2010 р.» (проекти 2.10; 2.17), у межах держбюджетної тематики науково-дослідних робіт 5/09 – П «Новітні енергетично ефективні харчові технології й нанотехнології в АПК» (№ держ. реєстрації 0109U000400) і в межах госпдоговірної тематики (9/10 - «Удосконалювання режимів екстрагування й розробка технології утилізації шламу кави»).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є створення інноваційного, ресурсо- енергоефективного обладнання для переробки кавового шламу, одержання екстракту кави і його зневоднення, а, також, розробка методів розрахунку й оптимізації такого обладнання.

Для здійснення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- виконати енергетичний аудит харчоконцентратного виробництва, дати аналіз потоків енергії, скласти структурні схеми конверсії енергії, обґрунтувати енергетичну концепцію виробництва;
- розробити фізичну схему і математичну модель процесу масопереносу в системі «кава - вода» в мікрохвильовому (МХ) полі при протитечійному режимі руху екстрагента і твердої фази;
- обґрунтувати аналітичну модель активації кавового шламу та модель вилучення з нього олії кави екстрагуванням в МХ-полі;

- створити наукові основи тепломасопереносу паропилогазового потоку в термосифонному пучку (розробити теплофізичну модель і виконати комплекс експериментальних досліджень);

- обґрунтувати методики і створити експериментальні стенди для комплексних досліджень комбінованих процесів екстрагування в МХ-полі для систем «зерна кави - вода» і «шлам - екстрагент», досліджувати вплив режимних параметрів на коефіцієнти масовіддачі і розробити інженерні методи розрахунку МХ-екстракторів;

- розробити способи додаткового вилучення речовин, що екстрагуються (водорозчинних і олії) з кавового шламу;

- провести обчислювальний експеримент і оптимізацію конструкцій ТМУ і МХ-екстракторів, розробити їх типорозмірні ряди;

- впровадити ТМУ до лінії виробництва розчинної кави, дати економічну оцінку ефективності його експлуатації;

- провести виробничі випробування МХ-екстрактора і дегустаційні дослідження інноваційних зразків концентратів і олії кави.

*Об'єкт дослідження* - паропилогазовий потік, зерна кави і кавовий шлам, комбіновані процеси і обладнання для екстрагування розчинних речовин з кавової сировини в умовах мікрохвильового поля, тепломасоутилізатор, теплотехнології харчоконцентратного виробництва.

*Предмет дослідження* - механізм, кінетика і апарати для екстрагування в умовах МХ-поля, сушіння в ІЧ-поле, тепломасообмін аерозольного теплоносія в пучку термосифонів.

*Методи досліджень* - теорія подібності, методи теплофізичного моделювання, експериментальні дослідження з використанням контрольно-вимірювальної апаратури, 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.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі сформульовані і доведені такі наукові положення.

1. Узгодження числа рядів і кроку термосифонів (ТС) і параметрів паропилогазового теплоносія (температури, вмісту пилу і вологи, його витрати) при низхідному русі потоку повітря і висхідному теплоносія забезпечує роботу рекуператора в режимі «самоочищення» поверхні теплопередачі. При цьому на верхніх рядах ТС виникають умови парціальної конденсації водяної пари з теплоносія, конденсат взаємодіє з водорозчинним пилом продукту, що осів у міжреберному просторі ТС, і шар осаджень переходить в стан плинності.

2. Застосування в процесі екстрагування з кавопродуктів електромагнітного підведення енергії дозволить організувати процес при ефективному протитечійному русі сировини і екстрагента, в умовах атмосферного тиску, при вилученні з капілярної структури зерен екстрактивних речовин за рахунок специфічного гідродинамічного потоку, що виникає при взаємодії імпульсного мікрохвильового поля з полярними молекулами рідини в капілярах сировини.

3. Застосування бародифузійних принципів при організації процесів екстрагування олії з шламу кави має забезпечити більший вихід цільового компоненту при

зниженні витрат енергії, зниження тривалості процесу і підвищення якості готового продукту.

4. Плавне підвищення тиску, витримка при максимальному тиску і подальше різке скидання тиску призведе до часткового або повного руйнування клітинних оболонок і активації структурованих білковмісних відходів переробки кавової сировини.

В результаті комплексу аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень вперше:

- визначені залежності впливу потужності мікрохвильового поля, температури, гідродинамічних умов в екстракторі на характер зміни концентрацій розчину і значення коефіцієнтів масовіддачі для безперервних режимів екстрагування з кавової сировини;

- проведені візуальні дослідження та отримані експериментальні профілограмми кінетики відкладень шару пилу на поверхні ТС, які узагальнені у вигляді експоненційної моделі формування шару пилу на поверхні ТС в залежності від часу експлуатації, параметрів аерозольного потоку і його швидкості;

- обґрунтована тризонна модель адгезійної взаємодії шару відкладень продукту на ТС і конденсату, встановлені критеріальні моделі, які описують міжкомпонентний масообмін реагуючих з потоком екстракту частинок продукту;

- отримано співвідношення в безрозмірних числах подібності для розрахунку інтенсивності масопереносу в протитечійних екстракторах кави з мікрохвильовими інтенсифікаторами;

- отримано співвідношення в безрозмірних числах подібності для розрахунку інтенсивності масопереносу в екстракторах періодичної дії з мікрохвильовим інтенсифікатором при виробництві олії кави;

- методами експериментального моделювання отримані термограми, лінії сушіння і швидкості сушіння кавового шламу на стрічкової ПЧ сушарці.

У роботі розширено уявлення і методом «аналізу розмірностей» отримані структури рівнянь в узагальнених змінних для розрахунку:

- комбінованих процесів екстрагування з капілярно-пористого тіла системи «шлам кави - вода» в умовах об'ємного, мікрохвильового підведення енергії в безперервних режимах роботи апарату;

- комбінованих процесів масопереносу в умовах об'ємного, мікрохвильового підведення енергії в періодичних режимах екстрагування олії кави в системах «шлам кави - етанол, гексан, нефрас»;

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблена Енергетична програма харчоконцентратного виробництва визначає пріоритетні шляхи підвищення ефективності використання енергетичних і сировинних ресурсів в технологіях ХК. Концепція програми може бути використана на більшості підприємств АПК.

Запропонований спосіб комплексної утилізації теплоти і пилу харчового продукту є принципово новим. Вперше запропонована конструкція рекуператора, який не тільки ефективно функціонує в умовах аерозольного теплоносія, а й дозволяє повертати в технологію викиди продукту і теплової енергії. Вперше у світовій практиці ТМУ впроваджений в лінію виробництва розчинної кави і успішно експлуатується з 1999 р.

Розроблений «тепломасоутилізувач» здатний в комплексі вирішувати проблеми екології, ресурсо- і енергоефективності. Запропонований типорозмірний ряд ТМУ може використовуватися в різних теплотехнологіях АПК. Конструкція апарату, що складається з окремих високоефективних модулів – термосифонів, відрізняється простотою монтажу і експлуатації. По суті це сучасний апарат екоіндустрії не тільки харчоконцентратних, але і цукрових, молочних, консервних та ін. технологій. Термін окупності ТМУ в межах 1 року.

Розроблений спосіб отримання кавових екстрактів під впливом МХ поля істотно інтенсифікує внутрішні процеси масообміну, дозволяє скоротити втрати смакоароматичних речовин в екстракті, поліпшити якість готового продукту, знизити втрати цільових компонентів, знизити розмір витрат енергії, перевести екстрактор на рівень робочих температур до 100 °С і атмосферних тисків.

Дослідно-промисловий зразок мікрохвильового екстрактора безперервної дії забезпечує інтенсифікацію процесу і дозволяє збільшити вихід готової продукції за рахунок додаткового вилучення водорозчинних речовин з кавового шламу на 10 – 15 %, таким чином, скорочуючи норми витрати кави – сировини. МХ екстрактор і робочі режими для екстрагування кавової сировини передані для впровадження на ПАТ «Енні Фудз» м. Одеса.

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.

Розроблений спосіб отримання кавової олії з шламу з використанням МХ-поля дозволяє отримувати рафіновану олію і кофеоль при зниженні втрат цільових компонентів і зменшенні питомих витрат енергії. Визначено шляхи переробки кавового шламу (наприклад, для виробництва пелет), запропонований проект лінії по утилізації шламу. Дана оцінка бізнесперспектив технологій утилізації.

**Особистий внесок здобувача.** Спільно з науковим консультантом (проф. Бурдо О.Г.) формулював наукові положення і концепції наукових досліджень. Автор безпосередньо здійснював наукове керівництво аспірантом Ружицькою Н.В. в напрямку ІЧ сушіння шламу і екстрагування олії кави. Планував експеримент, здійснював аналіз експериментальних даних, інтерпретував і узагальнював отримані результати. Брав участь в постановці досліджень і обговоренні результатів аналітичного та експериментального моделювання, які проводили асп. Перетяка С.Н. і Станєвський О.Л. Надалі представляв з ними спільні доповіді на міжнародних конференціях. Самостійно узагальнив результати цих робіт і запропонував основи теорії тепломасопереносу в термосифонних рекуператорах в умовах аерозольних теплоносіїв. Спільно з асп. Макіївської Т.Л. досліджував аналітичні та експериментальні моделі кінетики екстрагування кавового шламу, оптимізації процесу масопереносу екстрактивних речовин з твердої фази в рідину, представляв наукові доповіді і готував публікації. Брав участь в проектуванні нових зразків техніки (ТМУ і МХ- екстракторів), отриманні інноваційних неенергоміських кавопродуктів. Займався впровадженням інноваційних зразків техніки і продуктів в харчоконцентратній галузі України.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і вчених Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) в 1991...2016pp.; на Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів і устаткування харчових і хімічних виробництв» (Одеса, 2008, 2010, 2012, 2014pp); на науково-практичній конференції «Нанотехнології в харчовій промисловості» (Одеса, 2013); на II - IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2009, 2011, 2013, 2015pp); на 8-10 Int. Heat Pipe Conf.-(Beijing, China, 1992), (Albuquerque, USA, 1995), (Melbourne, Australia.-1997); на 3, 5 International Heat pipes symposium, ( Шанхай, Китай, 1991), Мельбурн, Австралія, 1996); International conference on Heat transfer with change phase, (Kielce, Poland, 1996); на Мінському міжнародному Форумі з тепломасообміну, (1996, 2000, 2012, 2016pp); на конференції «Сучасне хлібопекарське виробництво й перспективи його розвитку», (Москва, 1995); на Междунар. конф. “Екологія й теплотехніка”, (Дніпропетровськ, 1996); Congress CHISA-96, (Pragua, 1996); на Міжнародній науково-практичній конференції «Регіональні проблеми енергозбереження в децентралізованій теплоенергетиці», (Київ, 2000); на I – Simpozion Internațional «Biochimie și Biotehnologii în Industria Alimentară: (Chișinău, 2002); на 1-й Міжнародній конференції «Сучасні енергозберігаючі теплові технології (сушіння й термовологісна обробка матеріалів), (Москва, 2002); на VIII Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources», (Minsk, Belarus, 2011); на 11 міжнародній науково-практичній конференції «Фундаментальні та прикладні дослідження, розробка і застосування високотехнологій у промисловості», – (Санкт-Петербург, 2011); на Всеукр. науково-практ. конф. «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини», (Харківський державний університет харчових та торгівлі, 2011); на міжнародній науково-практичній конференції «Стратегія економічного розвитку харчової промисловості та забезпечення продовольчої безпеки країни», (Одеса, ОНАХТ, 2012); на науково-практичній конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» (Одеса, ОНАХТ, 2012, 2014, 2015 pp); на міжнародній науково-практичній конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості», – (Одеса, ОНАХТ, 2013).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковані у двох монографіях та 109 друкованих праць (8 - одноосібно), у тому числі 48 робіт у фахових виданнях України, з них 1 - у наукометричних фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз, 4 – у наукових виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію, 6 патентів України; 33 публікації в матеріалах міжнародних конференцій, тези 20 доповідей у матеріалах наукових конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, десяти розділів, висновків, списку літератури, що включає 369 найменувань вітчизняних і закордонних авторів на 42 сторінках, і чотирнадцяти додатків на 124 сторінках. Основний текст роботи викладено на 325 сторінках, включає 152 рисунки і 58 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета, завдання досліджень, наукові положення, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи та публікації за матеріалами дисертації.

У першому розділі «Сучасний рівень та проблеми виробництва харчових концентратів» наведена загальна характеристика технологій харчових концентратів, тенденції ринку кави, специфіка сировини й готового продукту, ефективність використання сировинних та енергетичних ресурсів, технології виробництва розчинної кави й проблеми цих технологій. Проаналізовано устаткування для екстрагування і сушіння. Розглянуто сучасні апарати для утилізації теплоти газових потоків і методи інтенсифікації процесу екстрагування. Подано аналіз наукових основ масопереносу при екстрагуванні з пористих матеріалів, які ґрунтуються на фундаментальних роботах Аксельруда Г.А., Белобородова В.В., Гончаренко Г.К., Гребенюка С.М., Ключкіна В.В., Лисянського В.М., Понамарєва В.Д., Рудобашти С.П. та інших. Розглянуто досягнення з проблем екстрагування у відомих наукових школах України: «Львівської політехніки» (Семенішин Є.М., Гумницький Я.М), НУХТа (Малежик І.Ф., Зав'ялов В.Л.), Донецький національний університет економіки та торгівлі (Поперечний А.М.), Львівської академії ветеринарної медицини (Білонога Ю.Л.). Показано перспективи інтенсифікації процесу сушіння на основі ІЧ-випромінювачів і процесу екстрагування на основі мікрохвильових технологій. Поставлено завдання переведення харчоконцентратних виробництв на екоіндустріальні принципи.

У другому розділі «Характеристика об'єктів, методології й методики досліджень» наведено структурні моделі теплотехнології ХК. Сформовано програму досліджень (рис. 1). Виконано декомпозицію технологічної лінії «парогенератор - варильний апарат-стрічкова сушарка» (виробництво других страв) і лінії «обсмажувальний апарат - екстрактор-вакуум випарний апарат-розпилювальна сушарка» (виробництво розчинної кави). Показано джерела теплових і сировинних викидів (відходи у вигляді шламу з екстракторів і дрібнодисперсного порошку кави із сушильним агентом, що відпрацював). Інструментом системного аналізу теплотехнологічного комплексу була методологія енергетичного менеджменту. Ключовим параметром, за яким проводиться оптимізація теплотехнологічної системи, є питомі витрати енергії на одиницю продукції ( $j$ , Дж/кг), поставлено завдання їх мінімізації. Подано оригінальну методику розрахунково-експериментального визначення теплових втрат. Методи математичного моделювання передбачали детерміновані підходи. Використовувалися теорія подібності й метод «аналізу розмірностей».

Наведено методи експериментального моделювання масопереносу в системі «вода - кадова сировина» і «кавовий шлам - екстрагент»: визначення концентрації екстрактивних речовин у розчині й граничні концентрації у твердій фазі, вологість кавового шламу, коефіцієнти масовіддачі, умови фазових рівноваг у системі «кавовий шлам - кадова олія - екстрагент», коефіцієнтів дифузії олії в етанолі й гексані. Розглянуто методику узагальнення результатів експериментів, зроблено оцінки погрешностей вимірів.



Рис.1. Програма досліджень.

У третьому розділі «Системний енергетичний та екологічний аналіз технологій харчових концентратів» дослідження проведені відповідно до розвитку енергетичних і екологічних протиріч у суспільстві, енергетичного й екологічного парадоксів, глобальної прогнозувальної моделі «Римського клубу» і періодами формування криз: енергетичної, екології, їжі. Розглянуто специфіку енергоекологічних криз в Україні, в різних галузях АПК.

Виконано теплоенергетичний аудит харчоконцентратного виробництва, при якому визначалися потоки енергоносіїв (рис. 2), вимірювалися температури поверхонь апаратів ( $t_{ка}$ ) і навколишнього середовища ( $t_{вс}$ ), розраховувалися відповідні значення коефіцієнтів тепловіддачі ( $\alpha_0$ ) і втрати теплоти від корпусу апарата. Сумарні втрати склали 115 кВт, з яких: 44 від РС, 26 від кожної СС і 5,3 від ВА. Установлено величини показників питомих витрат енергії на підприємстві, питомі обсяги споживання газу й електроенергії.

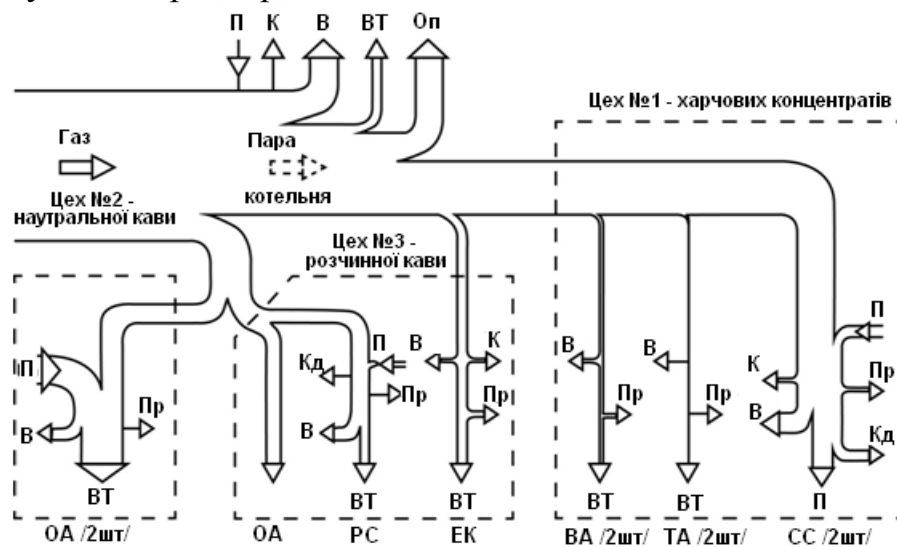


Рис.2. Структурна схема потоків енергії на харчоконцентратному виробництві (ОА – обсмажувальний апарат, РС – розпилювальна сушарка, ЕК – екстрактори, ВА – варильний апарат, ТА – топильний апарат, СС – стрічкова сушарка, П – повітря, К – втрати від корпусу, В – втрати, ВТ – втрати теплової енергії, Оп – опалення, Кд – конденсат, Пр - продукт).

Наступним етапом розрахунків була оцінка питомих витрат енергії ( $j$ ), тобто відношення обсягу спожитої енергії до обсягу випущеної продукції. Виходячи з цього проведено оцінку витрат енергії окремо на опалення ( $Q_{от}$ ), на технології ХК ( $Q_{ПК}$ ) і кави ( $Q_{КФ}$ ). Типова ілюстрація таких досліджень (рис.3) відбиває характер потоків, аналіз яких проведено для періоду 2010...2014 рр.

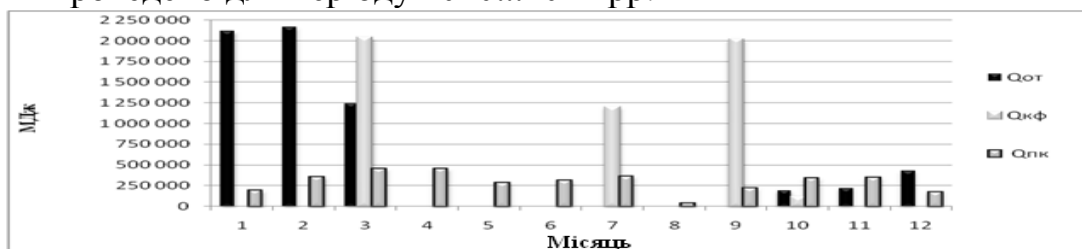


Рис. 3. Витрати енергії на опалення й технологію по місяцях.

Структура матеріальних витрат на ресурси визначає, що основні витрати пов'язані з оплатою за природний газ (66...70 %). Витрати на електроенергію становлять 23...24 %, а на воду - 7...10 %. Проведено оцінку конверсії енергії в

розпилювальній і в стрічковій сушарках. За результатами енергетичних досліджень зроблено такі висновки.

1. Суттєві резерви зниження витрат енергетичних ресурсів полягають в організаційних заходах. Тільки дотримання нормативних режимів роботи устаткування дасть скорочення витрат енергетичних ресурсів від 18 % (у котельні) до 50 % на РС.

2. Другим етапом удосконалювання теплотехнологій вважаються технічні заходи щодо утилізації теплових викидів і т.ін.

3. Третім етапом є впровадження інноваційних проектів ефективного підведення енергії в технологіях сушіння й екстрагування.

На розпилювальній сушарці (рис.4) доцільно встановити систему комплексної утилізації теплоти й пилу харчового продукту (СТМУ). У технології сушіння харчових концентратів (ТХК) стрічкову сушарку конвективного типу можна замінити на рекуперативну зі шнековим обертовим термосифоном (ОТС). Особливих перспектив можна чекати від впровадження сучасних принципів ефективного підведення енергії, використання електромагнітних генераторів (ЕМГ).

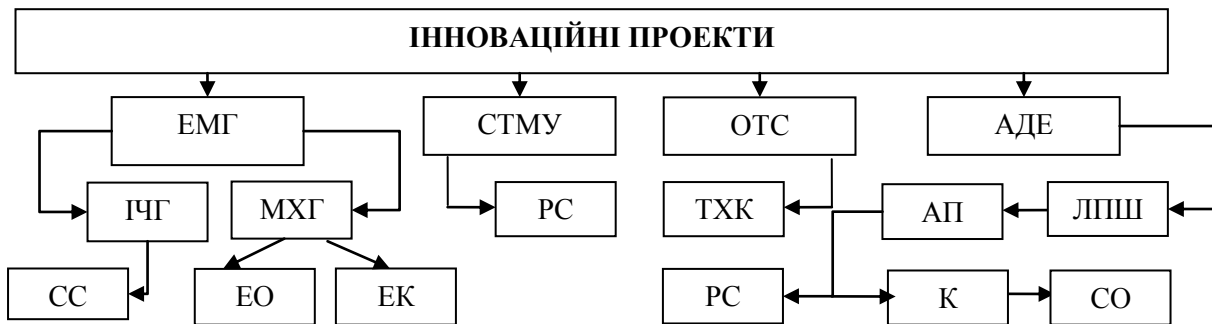


Рис.4. Класифікація інноваційних проектів.

Генератори інфрачервоного діапазону (ІЧГ) становлять інтерес у стрічковій сушарці як додаткові або самостійні реєстри. Генератори мікрохвильового діапазону (МХГ) дозволяють створити ефективні екстрактори для одержання рідких концентратів кави (ЕК) і виділення кавової олії (ЕО). Вирішувати проблеми енергозабезпечення підприємства можна за рахунок альтернативних джерел енергії (АДЕ). Для цього варто встановити лінію переробки шламу (ЛПШ) на агропелети (АП), які можуть повністю замінити природний газ у системі опалення (СО) і в розпилювальній сушарці. Ключові висновки такі.

1. Високий рівень термічного впливу на сировину визначає основні недоліки виробництва розчинної кави: значна енергоємність устаткування й тривалість технологічного процесу (7...8 год.) і використання високого тиску в екстракторах (0,3...1,5 МПа).

2. У процесі виробництва на стадіях подрібнювання, зберігання, екстрагування й сушіння наявні втрати (більше 80 %) цінних легколетких смакових і ароматичних речовин.

3. Викиди теплоносія із розпилювальної сушарки містять 0,055 м<sup>3</sup> пилу порошку кави в 1 м<sup>3</sup> теплоносія, а їхня температура становить 105 °С. У результаті за рік втрачається 8200 ГДж теплової енергії.

4. Основним енергоносієм підприємства є природний газ, питомі витрати якого

дорівнюють 75,56 МДж на 1 кг розчинної кави, й водяна пара, питомі витрати якої становлять 6,83 МДж на 1 кг ХК.

Екологічний моніторинг виробництва розчинної кави показав, що підприємство спричиняє серйозне навантаження на навколишнє середовище. Забруднювачами атмосфери є складові потоку теплоносія, що відпрацював: волога й пил кави, а також, теплота. За рік на одній установці втрачається 4,5 т порошку кави. Джерелами забруднень літосфери є кавовий шлам. На 1 кг готового продукту утвориться 6...8 кг кавового шламу. Так, при виробництві розчинної кави основний продукт становить 20...33 % від маси сирих зерен, 10...15 % доводиться на вологу, 57...63 % становлять відходи - кавовий шлам, який не утилізується і забруднює навколишнє середовище. Разом з тим, ці відходи містять до 4 % екстрактивних речовин, до 12 % олій, целюлозу та лігнін (60...75 %), суміш смакоароматичних речовин (3...5 %), білки (5...7 %).

Системи екологічного захисту спрямовані на вилучення з аерозольних викидів розпилювальної сушарки теплоти, вологи й пилу харчового продукту і глибоку переробку шламу.

Комерційна привабливість проектів визначається за рахунок:

- додаткового вилучення водорозчинних екстрактивних речовин, що підвищує вихід в екстракт на 10...12 %;
- дорогої і якісної олії кави (рафінованої і кофеоля), попит на яку на ринку підвищується;
- паливних елементів - пелет, енергія яких може забезпечити потреби підприємства в енергоносіях.

Таким чином, з екологічно проблемних відходів підприємство може отримати відчутний прибуток.

**У четвертому розділі** «Тепломасоперенос паропилогазових потоків в утилізаторах на випарних термосифонах» розглянуто технологічні схеми для утилізації теплової енергії і теплогенератори, які використовують переваги теплових труб. Запропоновано принципові схеми модернізації теплотехнологій харчоконцентратних виробництв на основі повітропідігрівників на теплових трубах і термосифонах (ТОТТ).

Особливістю теплоносія, що відпрацював, у багатьох харчових технологіях, є те, що гарячий потік є складною композицією газу, водяної пари й пилу харчового продукту. По запропонованій схемі аерозольний потік нагріває повітря, за допомогою двофазних термосифонів (рис.5).

Така технологія комплексної утилізації теплоти й пилу харчового продукту з аерозольних викидів сушарки запропонована в ОНАХТ і захищена патентом № 26470 України МПК F26В 3/02. В основі системи – оригінальний апарат, названий тепломасоутилізатором. Модулі теплопередачі виконано у вигляді автономних двофазних термосифонів.

Відкладення пилу в міжреберному просторі роблять неефективними традиційні теплоутилізатори. Для реалізації поставлених завдань формулюється гіпотеза: режим «самоочищення» поверхні теплопередачі утилізатора може бути забезпечений шляхом використання водяної пари із теплоносія, що відпрацював, організацією режимів конденсації пари з наступною взаємодією конденсату з пиловими відкладен-

нями, їхнім розчиненням і евакуацією з поверхні апарата (рис.5). Обмеження: потік повинен мати водорозчинні частки пилу.

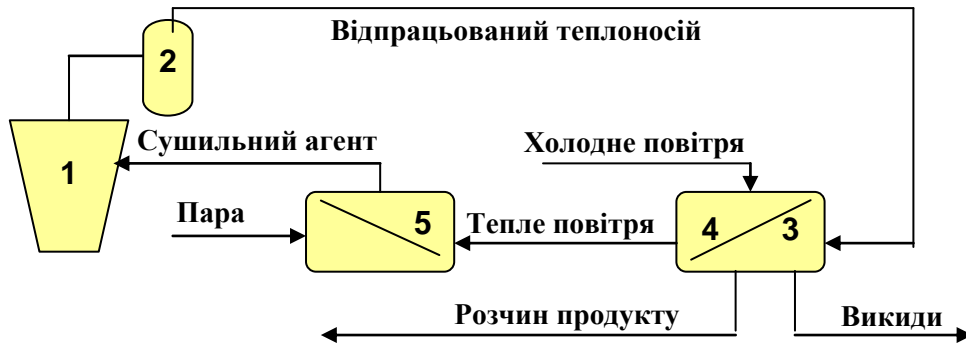


Рис.5. Система комплексної утилізації теплоти і пилу з аерозольних викидів сушарок (1 – сушарка, 2 – циклон, 3 – секція охолодження ТМУ, 4 – секція нагріву ТМУ, 5 – паровий калорифер).

При стіканні цього розчину з поверхні ТС в міжтрубному просторі ТМУ відбувається контакт розчину з гарячим потоком. Пил з аерозольного потоку частково розчиняється в конденсаті, що стікає. Всі ці процеси взаємозалежні, протікають сполучено й одночасно (рис. 6).

Ефективність очищення потоку від пилу досягається конструктивними особливостями апарата, властивостями оребреної поверхні. Конденсат розчиняє і змиває пил продукту з оребреної поверхні теплопередачі. Таким чином, апарат одночасно працює як фільтр (пилоочищення), скруббер і теплоутилізатор.

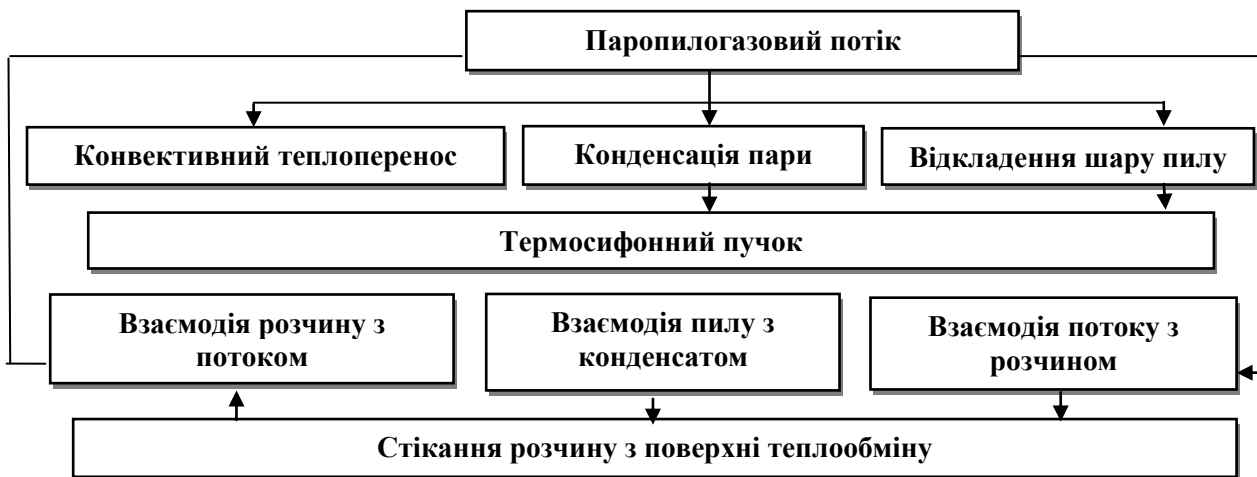


Рис. 6. Теплофізична модель сполучених процесів в ТМУ.

Використання в ТМУ двофазних термосифонів дозволяє організувати ефективний протиточний рух газових потоків із поперечним обтіканням оребрених труб. У результаті цього коефіцієнт теплопередачі становить 100-150 Вт/м<sup>2</sup>К (у традиційних гладкотрубних теплоутилізаторів він досягав тільки 40 Вт/м<sup>2</sup>К).

Оригінальна організація процесів теплопередачі в ТМУ дає позитивний ефект. По-перше, забезпечується екологічна чистота технології. По-друге, уловлюються частки дорогого харчового продукту. По-третє, знижуються витрати енергії. Робота апарата в такому режимі забезпечує «самоочищення» поверхні теплообміну. Досягаються гранично можливі теплотехнічні характеристики апарата.

Складною проблемою є визначення інтенсивності масопереносу з аерозольного потоку на поверхню ТС. В основі моделі формування шару твердих відкладень покладена гіпотеза про граничну рівновагу масопереносу  $m$ . Встановлювалася пропорційність  $m$  до коефіцієнта швидкості процесу  $k$ , концентрації часток продукту в потоці  $c$ , швидкості потоку, що набігає,  $w$ , резерву маси осадження на поверхні  $\Delta m$  і часу експлуатації. Причому  $\Delta m$  визначається як різниця граничної маси осадження  $m_\infty$  і маси осілого пилу  $m$  у момент часу  $\tau$ :  $dm = k c w (m_\infty - m) d\tau$ . Сполучення процесів у ТМУ потребує створення теоретичних основ тепломасопереносу паропилогазового потоку в пучку термосифонів (рис. 7).

Поставлено завдання й визначено цільову функцію оптимізації ТОТТ (рис. 7). На основі (1) вирішується завдання вибору раціонального співвідношення довжин випарника й конденсатора ( $L=L_1/L_2$ ). Обмеження полягають у тому, що матеріал теплообмінника, початкові різниці температур,  $\alpha_1, \alpha_2$  задані. Функція  $Q/M_{TT}=f(L)$  істотно залежить від  $\alpha$  ( $\alpha = \alpha_1/\alpha_2$ ), від температури теплоносіїв ( $T = T_1/T_2$ ).

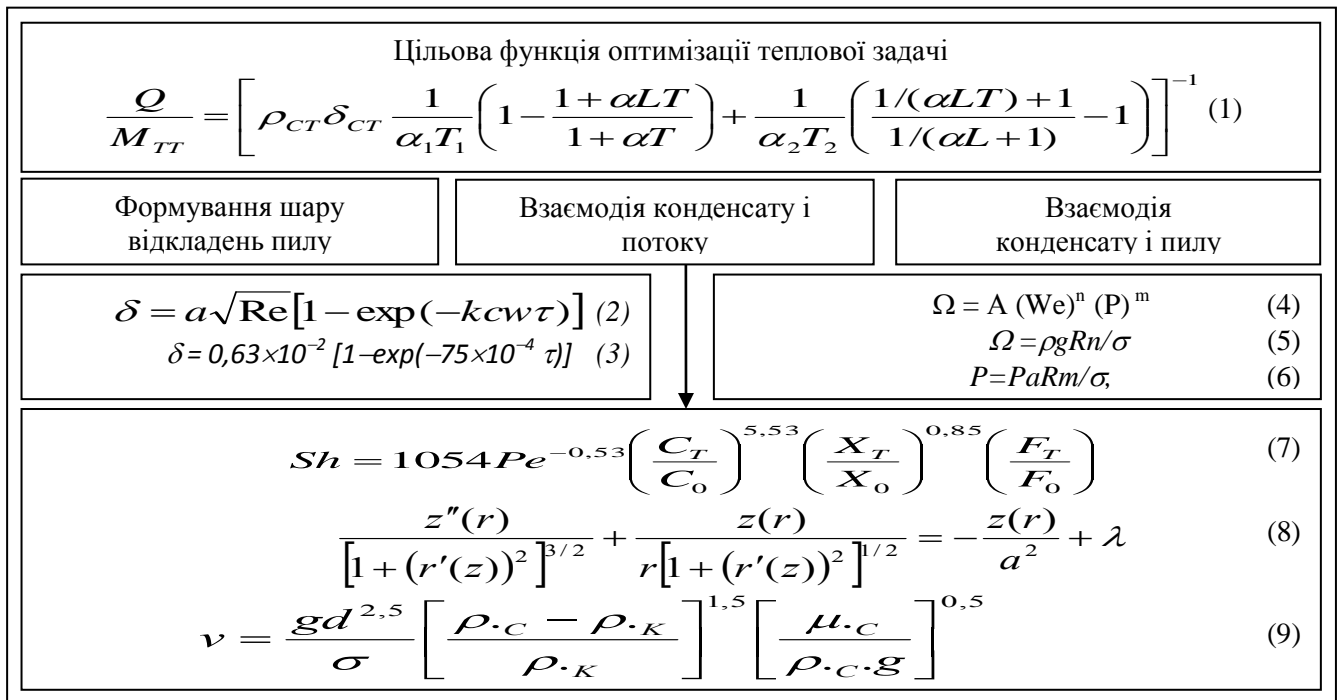


Рис. 7. Зведення моделей сполучених процесів тепломасопереносу в тепломасоутилізаторі на випарних термосифонах.

Для умов приграничного шару визначений закон росту товщини шару забруднень (рис. 7). Формула (2) має одну незалежну змінну  $\tau$ , один конструктивний розмір, три параметри потоку ( $c, v, w$ ) і два емпіричних коефіцієнти ( $k$  і  $a$ ). Ці коефіцієнти отримані в результаті постановки комплексних експериментальних досліджень. Суть таких дослідів полягала в установці ТС у газохід сушильного агента, що відпрацював. Періодично ТС витягалися і зважувалися. Так визначали масову витрату осідання пилу кави на ТС. Оригінальна методика дозволила встановити товщину відкладень кави по висоті ребер, по коловій координаті й по довжині ТС. Отримані епюри-профілограми систематизувалися, що дозволило створити модель локального

розподілу шару відкладень. Для інженерних завдань, для умов технології отримано закон зростання в часі середньої товщини шару відкладень пилу кави (3).

Наступний крок моделювання – це взаємодія шару пилу харчового продукту з конденсатом. Пил цукру, кави, сухого молока добре розчиняється водою, тому, в умовах парціальної конденсації буде проходити насичення конденсатом шару забруднень. Модель такого процесу подається як тризонна. У першій зоні (консолідації) відбувається розширення площі плям контакту “продукт - поверхня ТС”, збільшуються адгезійно-когезійні сили. На межі першої і другої зон досягається максимальне значення адгезійних сил. Друга зона (релаксації) переходить у третю – плинності. Модель підтверджена експериментально, отримані кількісні залежності адгезійних сил від вологовмісту пилу. Товщина плівки на поверхні в третій зоні визначається комбінованою дією сил інерції потоку, адгезії ( $Pa$ ) і поверхневого натягу ( $\sigma$ ). Обробка експериментальних даних (рис.7) виконана у вигляді рівняння в узагальнених змінних (4 - 6).

Для рівняння (4) експериментально визначені константи:

Продукт	A	n	m	З (4) розраховується товщина плівки, як різниця радіусів плівки ( $Rn$ ) и ТС ( $Rm$ ). Визначальними в (4) є число Вебера ( $We$ ) і комплекс $P$ .
Крохмаль	$4 \times 10^{-4}$	0,06	2,89	
Цукор	$32 \times 10^{-3}$	0,11	0,87	
Кава	$31 \times 10^{-4}$	0,15	1,16	

При моделюванні процесу взаємодії конденсату, що стікає із ТС з аерозольним потоком потрібно визначити результат реакції між краплями розчину й водорозчинних часток пилу продукту. Інтенсивність масообміну характеризується сукупністю великої кількості параметрів. У дослідженнях, проведених разом з О. Л. Станевським, у якості таких розглядалися параметри потоку: швидкість  $w$ , в'язкість  $\mu$ , щільність  $\rho$ , діаметр часток пилу  $d_q$  і їхня концентрація  $C_T$ , параметри крапель конденсату: їхній діаметр  $d$ , щільність  $\rho_k$  і концентрація  $X_k$  у міжтрубному просторі. Крім того, враховувалися масообмінні коефіцієнти: масовіддачі  $\beta$  і дифузії  $D$  і гравітаційна константа  $g$ . Обробка експериментальних даних по міжкомпонентному масопереносу проведена у формі (7, рис. 7). Дифузійне число Пекле ( $Pe_d = wd/D$ ) відповідає за формування дифузійного приграничного шару.

Важливим питанням є процес формування краплі конденсату на поверхні ТС. Модель еволюції краплі представлена трьома етапами. На першому етапі йде збільшення об'єму за рахунок парціальної конденсації водяної пари. При цьому крайовий кут зростає до рівноважного значення, а площа плями дотику краплі з поверхнею досягає максимальної величини. На другому етапі зростання об'єму краплі протікає за рахунок зміни її поверхні. Площа плями контакту залишається незмінною. На третьому етапі відбувається відділення краплі від поверхні.

Аналітичне рішення задачі діаметра краплі базується на розгляді рівняння Ейлера для контуру краплі в момент її відриву (8, рис. 7), де:  $r$  – поточне значення радіальної координати,  $z$  – поточне значення осьової координати в зонах краплі. Рівняння (8) трансформовано в систему алгебраїчних рівнянь, що залежить від параметрів рівняння Ейлера й дозволяє розрахувати еквівалентний радіус краплі. Швидкість руху краплі визначається за формулою (9, рис.7).

Комплекс співвідношень (1-9) є основою для розрахунку температурних полів, полів тисків і вологовмісту в потоці теплоносія. Співвідношення універсальні й придатні для більшості практичних завдань. По суті це наукові основи теорії тепломасопереносу паропилогазового потоку в ТМУ. У висновку запропоновано модернізації з використанням ТМУ в сушильних установках РЗ–ОСС, «НІМА» «Ниро-Атомайзер», Каскад, конвеєрної сушарки і обсмажувального апарата.

У п'ятому розділі «Розвиток теорії й техніки екстрагування рослинної сировини в електромагнітному полі» представлено статичні та кінетичні моделі процесу. При складанні статичних моделей, принципів побудови робочої лінії екстрагування в ЕМП автор повністю орієнтувався на класичний досвід. Специфіка кінетики досліджуваних процесів у можливій появі додаткових рушійних сил, які серйозно можуть вплинути на кінетику екстрагування в ЕМП. Підставою цього є науково-технічна гіпотеза, що формулюється в такий спосіб. В умовах електромагнітного поля відбувається взаємодія полярних молекул системи «продукт-екстрагент» і електромагнітної енергії, в результаті чого в капілярно-пористій структурі сировини утворюється парова фаза й ініціюється гідродинамічний потік, що може істотно знижувати внутрішньо-дифузійний опір сировини, інтенсифікувати процес масообміну, скоротити тривалість процесу й підвищити вихід екстрактивних компонентів. Потужність такого, «бародифузійного», потоку визначається відповідністю характеристик сировини й параметрів ЕМП.

Записавши класичне рівняння Фіка, визначивши матеріальні баланси за компонентом-носієм за висотою екстрактора після відповідних перетворень рівняння робочої лінії відносно  $X_i$ , набуває вигляду

$$X_i = \frac{\left( X_{\text{Э1}} - \frac{G_{\text{Д2}}}{M_{\text{P1}}} \cdot C_{\text{r2}} \right) - \left( X_{\text{Э1}} - \frac{G_{\text{Д2}}}{M_{\text{P1}}} \right) \cdot C_i}{\left( 1 - \frac{G_{\text{Д2}}}{M_{\text{P1}}} \cdot C_{\text{r2}} \right) - \left( 1 - \frac{G_{\text{Д2}}}{M_{\text{P1}}} \right) \cdot C_i} \quad (10)$$

В умовах впливу мікрохвильового поля дифузія у твердій фазі визначається за рівнянням Фіка, а масовий потік  $J_D$  у цьому випадку залежить від коефіцієнта дифузії  $D$  і градієнта концентрацій у твердому тілі:  $J_D = -D \cdot \text{grad}C_T$ . Завдяки конвективній дифузії, відбувається рух розчинних речовин із рідкої фази  $X_T$  у центр потоку, де їхня концентрація дорівнює  $X_{\text{Э}}$ . Інтенсивність конвективної дифузії визначається коефіцієнтом масовіддачі  $\beta$ :  $J_K = \beta \cdot (X_T - X_{\text{Э}})$ .

Механізм дії мікрохвильового поля (рис. 8) визначається тим, що паралельно руху масових потоків  $J_D$ ,  $J_K$  виникає ще один потік  $J_B$ . Частота викидів і кількість функціонуючих капілярів збільшується пропорційно електрофізичному впливу, потужності мікрохвильового поля (рис. 9). Потік, що виникає під дією електромагнітного поля, турбулізує приграничний шар, опір може бути на порядок нижчим, ніж у традиційних схемах масовіддачі. Крім дифузійного розвивається ще й сугубо гідродинамічний потік.

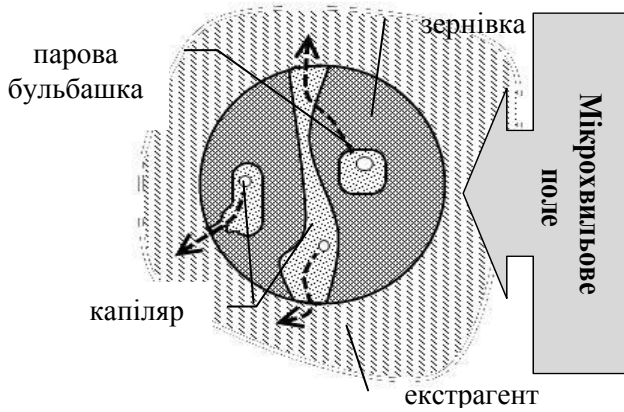
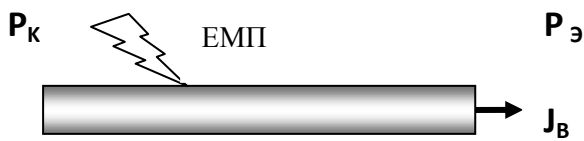


Рис. 8. Механізм бародифузії.

Масовий потік  $J_B$  залежить від різниці тисків у капілярі  $P_K$  та в потоці екстрагенту  $P_E$ , а також від коефіцієнта масовіддачі  $\beta'$ , який може істотно відрізнятись від  $\beta$ :  $J_B = \beta' \cdot (P_K - P_E)$ . Тиск, що забезпечує «запуск» бародифузії  $P_{БД} = P_E + P_K$ .



$$P_{Ki} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[ \frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g \cdot l_i + \frac{\sigma}{d_i} \quad (11)$$

Рис.9. Гідравлічна модель бародифузії ( $d_i$ ,  $l_i$  – діаметр і – довжина капіляра;  $w$  – швидкість рідини в капілярі;  $\rho$  – щільність рідини;  $\xi$  – місцеві опори;  $\sigma$  – сили поверхневого натягу;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;  $g$  – прискорення вільного падіння)

Гранична задача масопереносу (12 - 19) в умовах мікрохвильового поля є сполученою (рис. 10). При моделюванні масопереносу від поверхні твердої фази (18) використано відомий розв'язок граничної задачі (19). Підсумковий розподіл концентрацій екстрактивних речовин у системі визначається за принципом суперпозиції дії різноманітних за своєю фізичною природою рушійних сил. Рішення (19) допускає також, що відоме значення коефіцієнта дифузії  $D$  і відповідні компоненти швидкості. Навіть наближений розв'язок задачі (19) залежить від розуміння гідродинамічної ситуації, розв'язання рівняння Нав'є-Стокса.

Модель дифузії в стиснутих умовах капіляра пористого тіла складена за класичними принципами. Після запису рівняння дифузії в циліндричних координатах (12, 13) з відповідними граничними умовами, формулювання допущень, введенням беселевих функцій першого роду  $I_0$  і  $I_1$ , при параболічному профілі швидкостей концентраційне поле має вигляд (14). Для моделювання бародифузійного потоку  $J_B$  використано рівняння дифузії з точкового джерела в потік.

Потік екстрактивних компонентів  $A$ , що викидають у потік екстрагенту, що рухається в напрямі  $z$  з постійною швидкістю  $w_0$  визначається рівнянням (15): і такими граничними умовами:  $X|_{l=\infty}=0$ ;  $4 \pi l D (\partial X / \partial r) = w$ , при  $l \rightarrow 0$ ;  $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$  (де  $l$  – відстань від джерела;  $z$  – відстань по потоці від джерела;  $w$  – швидкість, з якої екстрактивні компоненти  $A$  входять у потік).

У випадку, коли швидкість потоку постійна ( $w_0$ ), а режим стабілізувався, розв'язок має вигляд (16). Оскільки  $J_B = X w_A \rho$ , потік речовини із точкового джерела запишеться як (17).

Дифузія всередині капіляра	Дифузія з пористої сфери	Перенос із точкового джерела
$w_0 \frac{\partial X}{\partial Z} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (12)$ $w_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{0,5d} \right)^2 \right] \frac{\partial X}{\partial Z} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (13)$ $\frac{X_r'' - X_p'}{X_\Delta - X_p'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp - b_n \left( \frac{D}{w_{c,p} 0,25d^2} \right) Z \quad (14)$		$w_0 (\partial X / \partial Z) = D \nabla^2 X \quad (15)$ $X = \frac{w_A}{4\pi \cdot D l} \exp \left[ - \left( \frac{w_0}{lD} \right) (l - z)^2 \right] \quad (16)$ $J_B = \frac{\rho \cdot w_A^2}{4\pi D l} \exp \left[ - \left( \frac{w_0}{lD} \right) (l - z)^2 \right] \quad (17)$
$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (18)$ $c(\tau, x, y) = \frac{1}{(1 - D\tau)^2} \left\{ \exp [(w_x + w_y)\tau - ( x  +  y )] + D\tau \exp \frac{1}{\sqrt{D\tau}} [(w_x + w_y)\tau - ( x  +  y )] - \right. \\ \left. - \sqrt{D\tau} \left\{ \exp \left[ \left( w_x + \frac{w_y}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - \left(  x  + \frac{ y }{\sqrt{D\tau}} \right) \right] + \exp \left[ \left( w_y + \frac{w_x}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - \left(  y  + \frac{ x }{\sqrt{D\tau}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (19)$		

Рис. 10. Зведення моделей сполучених процесів тепломасопереносу при екстрагуванні в мікрохвильовому полі.

Для одномірної задачі  $l = z$ , тоді рівняння (17) спроститься:  $J_B = \frac{\rho \cdot w_A^2}{4\pi D \cdot z}$ . При ламінарному режимі входження екстрактивних компонентів у потік, швидкість їхнього входження в потік  $w$  і величина потоку визначаються, як:

$$w_A = \frac{\Delta P \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot z}, \quad J_B = \frac{\rho \cdot \Delta P^2 \cdot d^4}{4096 \cdot \mu^2 \cdot z^3 \pi \cdot D} \quad (20)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища, Па с;  $d$  – діаметр капіляра, м;  $\Delta P = P_{БД} - P_{\Delta}$  – різниця тисків усередині відкритої пори (капіляра) і в потоці екстрагенту, Па.

Бародифузійний потік приводить до труднощів поділу потоків  $J_D$ ,  $J_K$  і  $J_B$ , оскільки явище бародифузії вносить збурювання в усі зазначені складові процесу масопереносу цільового компонента в системі «кавова сировина - екстрагент», тому загальний потік маси запишемо у вигляді:  $J_M = \beta_{\Delta} (C_{тек} - C_p)$ , де  $\beta_{\Delta}$  – ефективний коефіцієнт масовіддачі, що враховує внутрішні, зовнішні і бародифузійні процеси.

Швидкість зміни концентрації екстрактивних речовин у рідкій фазі можна записати:  $\frac{\partial X}{\partial \tau} = -\nabla(w_{\Delta} \cdot X) + J_M S_{y\Delta} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} - \nabla(D \nabla C_T)$ . Вважаючи, що концентрація екстрактивних речовин змінюється тільки по осі  $z$ , одержимо:

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = -w_{\Delta} \frac{\partial X}{\partial z} + J_M S_{y\Delta} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (21)$$

Очевидно, що навіть при настільки суттєвих спрощеннях задачі, які зроблені при її постановці, спільні розв'язки (12 - 19) і (21) досить складні. Гідродинамічна ситуація у потоці визначається турбулентним плином екстрагенту, ускладненим вихровою дифузією з каналів кавової сировини. У цьому випадку, доцільно застосувати експериментальне моделювання. Для визначення структури критеріальних моделей використано метод «аналізу розмірностей».

На ефективний коефіцієнт масовіддачі  $\beta_{\Delta\phi}$ , що характеризує процес масовідда-

чі в умовах виникнення бародифузії, впливають розмір часток  $d$ , щільність потоку  $\rho$  і в'язкість  $\mu$ , коефіцієнт дифузії  $D$ , різниця концентрацій  $\Delta C$ , і гравітаційне поле  $g$ . Дія бародифузії визначається потужністю мікрохвильового інтенсифікатора  $N$ , питомою теплотою паротворення  $r$ . Варто врахувати витрату продукту ( $G_{np}$ ) й екстрагенту ( $G_{poz}$ ). Тоді виходить така залежність у загальному вигляді:  $\beta\alpha_\phi = f(d, \rho, \mu, D, r, \Delta C, N, G_{np}, G_{рас}, g)$ . Всі параметри складаються із трьох основних розмірностей: довжини (м), маси (кг) і часу (с). Оскільки число змінних  $n = 11$ , число одиниць виміру  $m = 3$ , то кількість безрозмірних комплексів, які описують процес (згідно з  $\pi$ -теоремою) дорівнює:  $\pi = (n - m) = 8$ . Після складання матриці розмірностей отримано комплекси, які традиційно використовуються в завданнях масообміну (числа Шервуда, Шмідта, Грасгофа). Вплив мікрохвильового поля враховується числом, запропонованим О. Г. Бурдо:  $\frac{N}{rG_{poz}} = Bu$ . Чим ближче число  $Bu$  до 1, тим більше утво-

риться парової фази, тим більший градієнт тисків і більш інтенсивні викиди насиченого екстракту з капілярів, і більша турбулізація суміжного шару. Отже, число  $Bu$  може характеризувати не тільки ступінь енергетичного впливу, але й відповідну гідравлічну ситуацію в касеті. Бародифузія нівелює внесок природної конвекції й число Грасгофа можна виключити із критеріального рівняння. Так отримано структури критеріальних рівнянь для періодичного (22) і безперервного процесу екстрагування (23) у МХ-полі:

$$Sh = A(Sc)^n (Bu)^m \left( \frac{G_{II}}{G_P} \right)^k \quad (22), \quad St_m = A(Re)^m (Sc)^n (Bu)^p (\Pi)^k \quad (23)$$

Комплекс  $\Pi = \frac{k}{H^2}$  є безрозмірною параметричною проникністю й ураховує геометрію укладання часток твердого матеріалу.

Число Стантона безпосередньо пов'язане з дифузійним опором, воно не залежить від уявлення про пристінний суміжний шар, як про зону дії молекулярного механізму масопереносу. Вивід числа Шервуда заснований саме на аналізі такого пристінного шару.

**У шостому розділі** «Експериментальні дослідження процесів екстрагування в мікрохвильовому полі» сформульовано завдання й дано загальну характеристику експериментів. Дослідження проводилися на п'ятих експериментальних установках. Стенд № 1 складався із сухоповітряного термостата й забезпечував стабілізацію температури всередині ємності. Основним елементом стенда № 2 була мікрохвильова камера. Стенд забезпечував регулювання потужності мікрохвильового поля, визначення температури й концентрації екстрагенту, потужність випромінювання. Досліди з гідравліки та масообміну в касетах проводилися на експериментальному стенді № 3. Металева камера, у якій розташовується блок масообмінних модулів, оснащена генератором мікрохвильового випромінювання. Ваговий метод забезпечував високу точність вимірювань витрат, надійно встановлювалося також значення напору. На стенді № 4 проводилися досліди із визначення вмісту екстрактивних речовин у шламі, а також дослідження кінетики екстрагування олії в умовах дії мікрохвильового поля. На стенді № 5 досліджували коефіцієнт дифузії олії в етанол і гексан. Концентрація олії в пробах визначалася висушуванням до постійної маси. На

першому етапі визначали максимальні концентрації екстрактивних речовин у кавовому шламi (рис. 10). Дослiди проводилися на стендi при температурi 80 °C i гiдромодулi 1:4 на фракцiях розмiром 0,5...2 мм. Визначався ступiнь вилучення екстрактивних речовин за насиченням розчину.

Цiкаві результати отриманi при стендових дослiдженнях гiдравлiчних характеристик касет при поздовжньому проходi води крiзь шар шламу. При всiх значеннях висоти шару шламу: 27 мм, 20 мм, 14 мм (вiдповiдно лiнii 1, 2 i 3, рис.12) отриманi залежностi – це опуклi кривi, а класична залежностi має ввiгнутий характер. Пояснюється цей «парадокс» тiєю обставиною, що горизонтальнi потоки передають енергiю часткам кавової сировини, товщина шару росте i його пористiсть зростає. У результатi цього спостерiгається зниження гiдравлiчного опору шару.



Рис.11. Граничні концентрації.

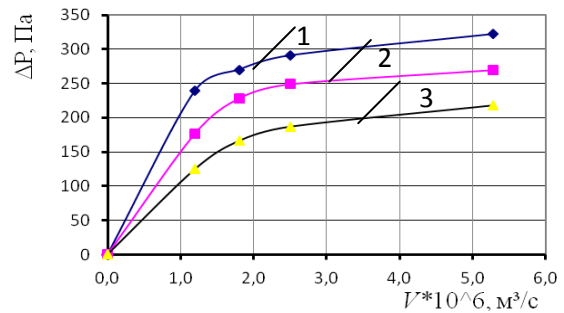


Рис.12. Гiдравлiка касет: 1 – 27 мм; 2 – 20 мм; 3 – 14 мм.

Це свiдчить про сприятливе для процесiв екстрагування явище: гiдродинамiчна ситуацiя з таким псевдозрiдненням шару, напевно, буде сприяти iнтенсифiкацiї процесiв переносу. Встановлено, що для забезпечення тонкошарових течiй у шарi дослiджуваного продукту, збiльшення поверхнi фазового контакту доцiльно працювати в дiапазонах витрат  $1,4 \cdot 10^{-6} \dots 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  i при значеннях товщини шару кавової сировини  $1 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Дослiджувався вплив основних параметрiв. Питому потужностi задавали у 270, 450, 630, 900 Вт/кг (вiдповiдно лiнii 1, 3, 2, 4, рис. 13,а). Висота шару шламу дорiвнювала 8, 14, 20 i 27 мм (вiдповiдно лiнii 1, 2, 3, 4 рис. 13,б). Об'ємна витрата екстрагенту змiнювалася:  $1 \cdot 10^{-6}$ ,  $2 \cdot 10^{-6}$  i  $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (вiдповiдно лiнii 1, 2, 3 рис. 13, с).

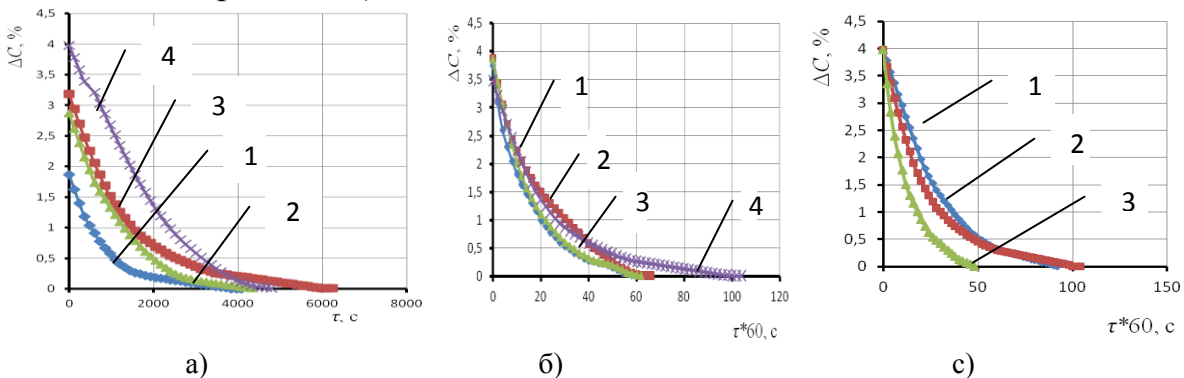


Рис. 13. Кiнетика масопереносу водорозчинних речовин у МХ-полi.

Установлено, що на процес масопереносу впливають не тiльки величина енергопiдведення i товщина шару, але й витрати екстрагенту. При збiльшеннi об'ємної витрати екстрагенту в 3 рази вихiд екстрактивних речовин зi шламу пiдвищується на

35 % і час екстрагування скорочується в 2 рази (рис. 13, с). Це є чинником істотного зниження зовнішнього дифузійного опору. При збільшенні швидкості потоку в 2,5...3,5 рази ефективний коефіцієнт масовіддачі збільшується в 2,7...5 разів відповідно.

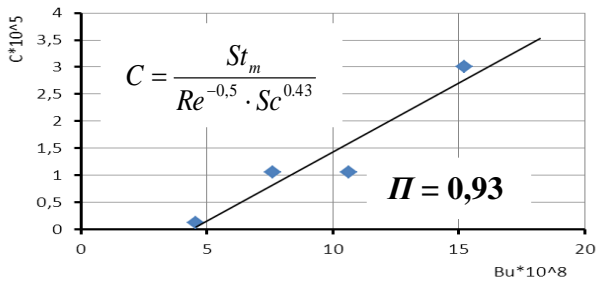


Рис. 14. Залежність  $C = f(Bu)$ .

$$St_m = 0,004 (Re)^{-0,5} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,6} (Bu)^{0,33}. \quad (24)$$

Перевірка адекватності моделі (24) проводилася при порівнянні експериментальних даних  $St_{m_{exp}}$  з розрахунковими  $St_{m_{theor}}$  значеннями для безперервного режиму обробки. Максимальна відносна похибка розрахунку за співвідношенням (24) становить 17,6 % і спостерігається при малих значеннях числа Стантона.

На першому етапі досліджень екстрагування олії кави зі шламу визначалися значення коефіцієнтів дифузії при температурі 25 °С.

екстрагент	$D \cdot 10^9, \text{ м}^2/\text{с}$	Експерименти з кінетики масопереносу
спирт	1,13	проводилися в термостаті і в МХ-екстракторі.
гексан	1,3	Гідромодуль становив 1: 3 і 1:10.

Температуру контролювали за допомогою пірометра випромінювання та електронного контактного термометра DAN-1000. Типові кінетичні залежності екстрагування етанолом (рис. 15) якісно подібні до режимів роботи з гексаном і нефрасом. Порівняння результатів дозволяє зробити три такі висновки. Перший висновок тривіальний – у мікрохвильовому полі зі збільшенням температури збільшується швидкість вилучення речовин, а в умовах кипіння розчинника швидкість процесу й кількість вилучених речовин значно більша, що пояснюється турбулізацією граничного шару (рис. 15,а). Другий висновок - у мікрохвильовому полі процес екстрагування протікає в кілька разів інтенсивніше в режимах кипіння і практично на порядок вищий при температурах нижчих, ніж температура кипіння (рис. 16). Третій висновок несподіваний і стосується неполярного екстрагенту – гексана, для якого швидкості екстрагування при кипінні і при 60 °С досить близькі. Це можна пояснити тим, що енергія мікрохвиль поглинається в основному вологою, що втримується в капілярах шламу, а гексан нагрівається вже від шламу. Тобто парова фаза в капілярах, а відповідно й бародифузійний потік в сировину утвориться вже при низьких температурах екстрагенту. Крім того такі ізомери гексана, як 2,2-Диметилбутан, 2,3-Диметилбутан і 2-Метилпентан киплять при температурах 49,7 °С, 58 °С і 60,3 °С відповідно, що також може викликати часткову турбулізацію прикордонного шару при температурах нижчих від температури кипіння.

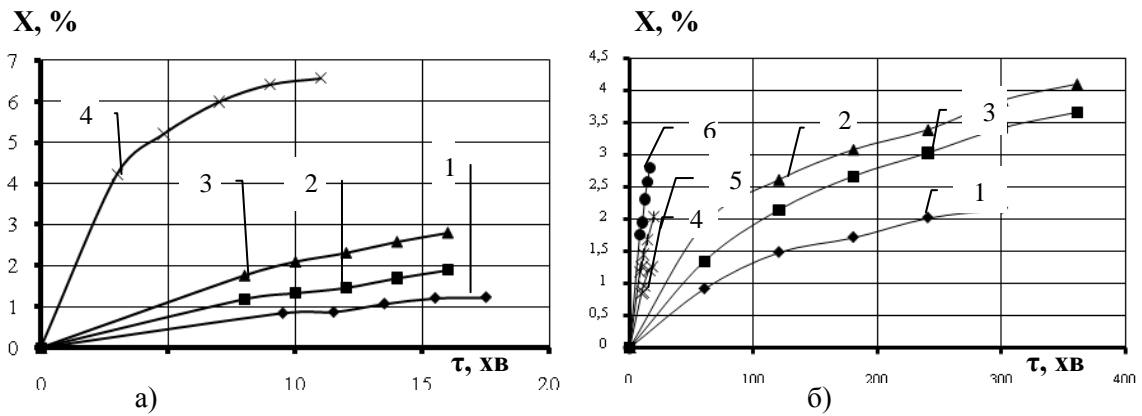


Рис. 15. а) - Вплив температури екстрагенту (етанолу) в умовах дії МХ-поля (стенд №4) : 1 – 40 °С; 2 – 50 °С; 3 – 60 °С; 4 – 78,5 °С (кипіння); б) - Вплив характеру підведення енергії на екстрагування спиртом: (1–3 термостат; 4-6 у МХ полі), 1 і 4 – 40 °С ; 2 і 5 – 50 °С; 3 і 6 – 60 °С

Перевірено вплив природи екстрагенту й умов підведення енергії (рис.16).

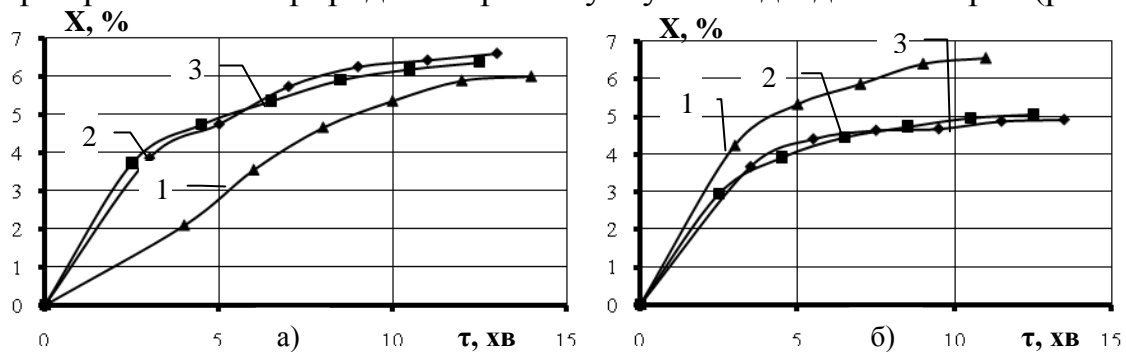


Рис. 16. Вплив характеру екстрагенту (режим кипіння), а)- термостат, б): МХ-поле (1 – спирт; 2 – нефрас; 3 – гексан).

Питома потужність становила 1,3 кВт/кг суміші шлам - екстрагент.

У традиційних технологіях підведення теплоти (рис.16,а) більш ефективними у якості екстрагентів визнані гексан і нефрас. Однак спостерігається істотна інтенсифікація процесу екстрагування етанолом у мікрохвильовому полі (рис. 16,б). Більше того, вилучення олії та екстрактивних речовин у мікрохвильовому полі спиртом більше, ніж гексаном і нефрасом. Тривалість процесу у МХ-полі майже в 20 разів менша, ніж у термостаті. Обробка масиву експериментальних даних визначила для розрахунків процесу масопереносу олії з кавового шламу в умовах дії мікрохвильового поля рівняння (25) для спирту етилового й (26) для гексану.

$$Sh = 0,0137(Sc)^{0,33}(Γ)^{0,15}(Bu)^{0,71} \quad (25), \quad Sh = 0,01(Sc)^{0,33}(Γ)^{0,05}(Bu)^{0,32} \quad (26)$$

Етанол, на відміну від гексану, сприяє переходу в екстракт додатково ароматичних компонентів, що в ряді технологій є більш привабливим.

У сьомому розділі «Експериментальні дослідження кінетики інфрачервоного сушіння» проводилися з кавовим шламом і вареним горохом.

Дослідження в нерухомому шарі продукту проводилися на стенді, що складався з ІЧ-камери, електронних ваг, двох ІЧ-генераторів, касети із продуктом, системи вимірювання температури продукту і повітря в камері та витрат енергії. Швидкість повітря в камері змінювалася в межах 0,5...2,5 м/с. Результати виміру ваги й температури шару фіксувалися програмно-апаратним комплексом стенда. У безперервному режимі комп'ютер обробляв інформацію і виводив на монітор лінії трендів маси продукту, лінії сушіння і швидкості сушіння продукту, температури продукту, пові-

тря в камері, сухого й вологого термометрів на виході повітря з камери.

Другий стенд складався зі стрічкового конвеєра, трьох модулів ІЧ (двох кварцових випромінювачів потужністю 550 Вт кожен). Стрічка приводиться в рух електродвигуном Oriental Motor 6-90 W, кількість обертів у якому плавно регулюється. Досліди проведені в широкому діапазоні зміни параметрів (табл.1).

Таблиця 1

Діапазон досліджень сушіння шламу			
Потужність ІЧ, кВт/м <sup>2</sup>	Температура, T, °C	Завантаження g, кг/м <sup>2</sup>	Тривалість процесу τ, хв
2,5...10	45...130	2,5...7...7,5	20...100

Термограми процесу і лінії сушіння наведено на рис.17.

При підведенні енергії від 10 кВт/м<sup>2</sup> температура росте практично лінійно, і такий режим сушіння можна вважати неефективним, (рис. 17, а).

Збільшення потужності, що підводиться, в 4 рази зменшує час сушіння в 2,5 рази (рис.17, б). Аналогічні експериментальні залежності отримані при аналізі впливу та інших важливих факторів. Так, зміна відстані продукту від випромінювача в межах 7...13 см не має істотного впливу на швидкість видалення вологи зі шламу (менш 5 %).

Питоме завантаження істотно впливає на швидкість сушіння. З одного боку, збільшення товщини шару на стрічці сушарки збільшує продуктивність установки, з іншого – зменшується швидкість процесу. Зменшення товщини шару шламу в 2 рази веде до збільшення швидкості сушіння в 2...3 рази. Збільшення товщини шару також веде до нерівномірності нагрівання. Тоді, як температура в товщі шламу не перевищує 70 °C, поверхня розігрівається до 150 °C і вище.

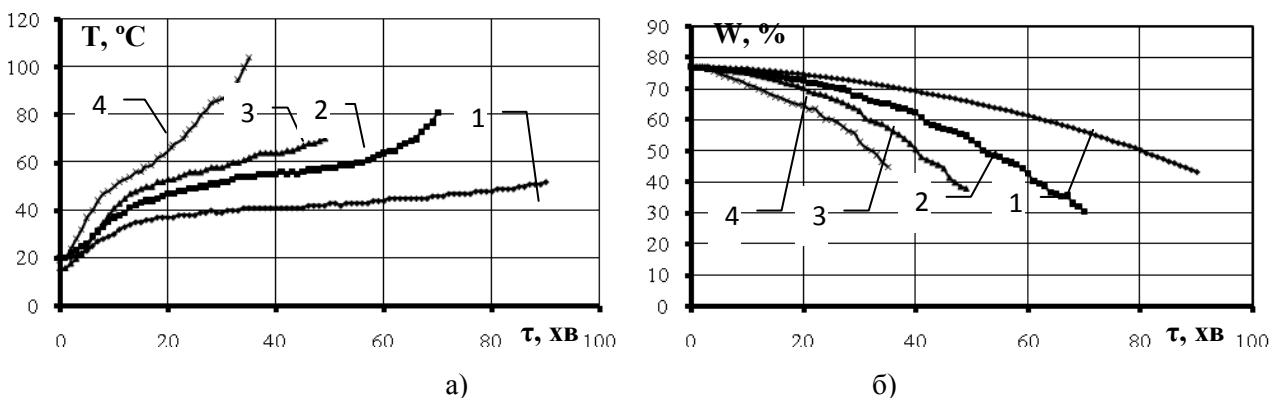


Рис. 17. Термограми (а) і лінії сушіння (б) кавового шламу при  $g = 2,5 \text{ кг/м}^2$  і питомій потужності (кВт/м<sup>2</sup>): 1 – 2,5; 2 – 5 ; 3 – 7,5 ; 4 – 10.

Спеціальна серія дослідів присвячена вивченню впливу швидкості руху повітря в камері. Примусова вентиляція сушильної камери з одного боку знижує дифузійний опір граничного шару. З іншого – ростуть втрати теплової енергії з повітрям, що зменшує швидкість і енергоефективність процесу сушіння. Дослідження проводилися при питомому завантаженні 2,5 кг/м<sup>2</sup>, і підведенні 5 кВт/м<sup>2</sup> потужності, на відстані 0,13 м від випромінювачів (рис. 18). Результати досліджень (рис.18) дають підстави рекомендувати підтримувати значення витрат повітря в сушарці на рівні 0,5 м/с.

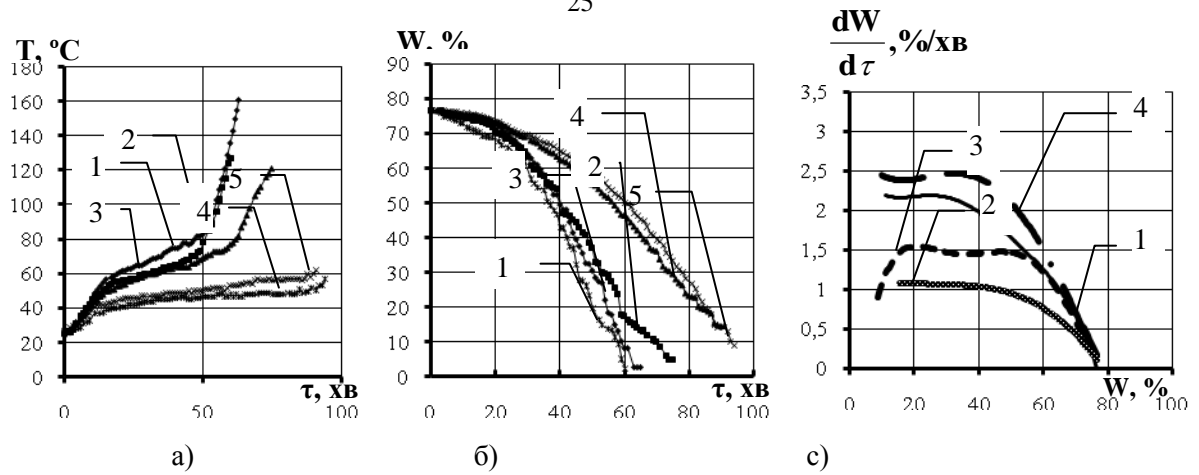


Рис. 18. Термограми (а), лінії сушіння (б) і швидкості сушіння (с) при швидкості повітря в камері: 1 – 0 м/с; 2 – 0,5 м/с; 3 – 1 м/с; 4 – 2 м/с; 5 – 2,5 м/с.

Дослідження кінетики ІЧ сушіння кавового шламу в шарі, що рухається, проводилося на одному й на групі модулів. Досліди на одному ІЧ-модулі проводилися при швидкості руху стрічки транспортера 0,13 см/с, питомому завантаженню 3 кг/м<sup>2</sup> (рис. 19, а).

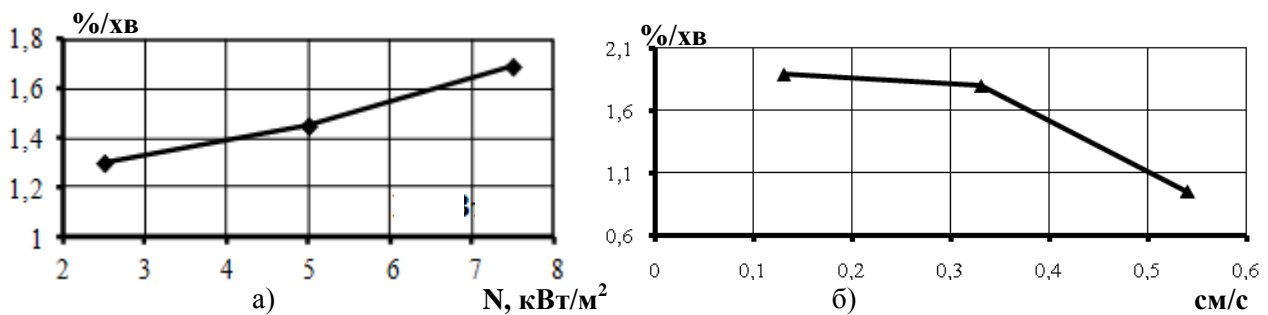


Рис. 19. Вплив питомої потужності ІЧ (а) і швидкості руху стрічки (б) на швидкість сушіння

При збільшенні кількості підведеної енергії в три рази, швидкість видалення вологи зростає на 30 % (рис. 19, а). У середньому швидкість сушіння становить 1,3...1...1,7 %/хв. Досліди (рис. 19, б) відповідають  $g = 2,5 \text{ кг/м}^2$  і  $N = 5 \text{ кВт/м}^2$ . На мінімальній швидкості продукт нагрівається більш інтенсивно, але термічного ушкодження верхнього шару від ІЧ-випромінювання не спостерігалось. Продуктивність установки в режимі завантаження 3 кг/м<sup>2</sup> при швидкості 0,33 см/с склала 1,5 кг/год сухого шламу вологістю 10 %.

Збільшення кількості ІЧ-модулів від 1 до 3 підвищує швидкість сушіння в 1,5 рази. Досліди проводилися при швидкості руху стрічки транспортера 0,33 см/с,  $g = 2,5 \text{ кг/м}^2$  і  $N = 5 \text{ кВт/м}^2$ .

У результаті зроблено висновок, що кількість модулів, відстань між ними, швидкість руху стрічки, потужність ІЧ-випромінювачів і питоме завантаження стрічки продуктом - це складне багатопараметричне завдання оптимізації, що має самостійне рішення для кожного виду продукту і його початкового та кінцевого вологовмістів. Разом із тим, інформація, представлена в розділі, дозволяє виконати проектні роботи зі створення конструкції ІЧ-сушарки кавового шламу.

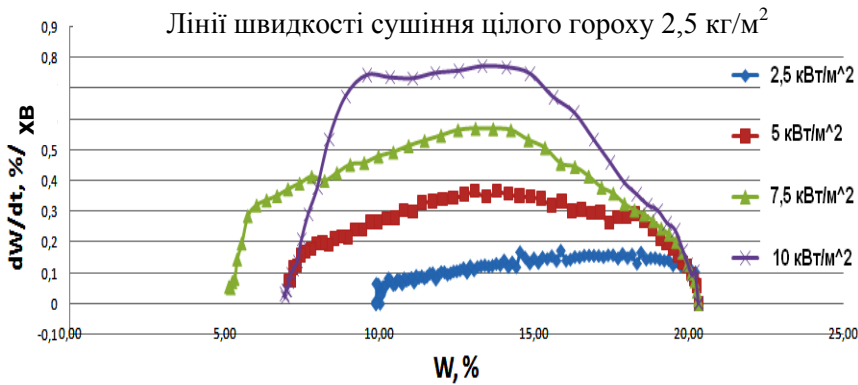


Рис. 20. Вплив потужності підведеної енергії на швидкість сушіння.

Експериментальні дослідження процесу сушіння вареного гороху визначають вплив питомого навантаження на стрічку і питомої потужності нагрівачів на головний показник - швидкість сушіння (рис. 20).

Отримані результати дозволяють проводити модернізацію стрічкової сушарки з ПЧ- нагрівачами.

У восьмому розділі «Процеси й інноваційні апарати для переробки твердої фракції кавового шламу» досліджується науково-технічна гіпотеза «баротермічної активації», ідея якої відображена в 4 науковому положенні роботи. Це новий спосіб деструкції рослинної сировини, запропонований на кафедрі процесів, апаратів і енергетичного менеджменту ОНАХТ. В основі технічної ідеї способу – реакція оболонки клітини при послідовному підведенні до неї енергії, витримці й різкому скиданню тиску на третьому етапі. В основі аналізу безперервно-гетерогенна модель системи. Вхідними параметрами вважаються:  $V_k$  – об'єм клітини;  $F_k$  – площа поверхні клітини; діаметр клітинних пор  $d_{п}$ ;  $\delta$  – товщина клітинних стінок;  $\varepsilon$  – пористість оболонки;  $T_k$  – температура клітини;  $P_k$  – тиск всередині клітини;  $C_k$  – концентрації в ній розчинних компонентів;  $\tau$  – час процесу;  $Q$  – кількість теплоти. Вихідними параметрами можуть бути оптимізований тиск у реакторі  $P_{опт}$ , час витримки сировини  $\tau_b$ ,  $T_a$ ,  $T_{ap}$  – температура в реакторі. Критерієм оптимізації в цьому випадку може бути адгезія після реакційної маси, що виражається зусиллям відриву ( $F$ , н/м<sup>2</sup>):  $F = f(P_{ap}, T_{ap}, \tau_b)$ . Фізична модель баротермічної активації включає 3 етапи.

I. Перший етап: збільшення тиску всередині клітини та дифузія розчинника через оболонку клітини. Зміна об'єму клітини  $V_k$ , температури  $T_k$ , тиску  $P_k$  і концентрації в ній розчинних компонентів  $C_k$ , подаються в такий спосіб.

$$\tau_0 < \tau < \tau_n; \quad P_0 < P_a \leq P_n; \quad T_0 < T_a \leq T_n$$

$$\frac{dV_k}{d\tau} = \beta \cdot \varepsilon \cdot F \frac{\rho_a}{\rho_k} [C_a(\tau) - C_k(\tau)] + F_k \cdot \varepsilon \frac{P_a(\tau) - P_k(\tau)}{\delta} + \frac{1 - \varepsilon}{r \cdot \rho^u} \cdot q_u \cdot dF \quad (27)$$

У співвідношенні (27) перший доданок ураховує ефект масопереносу, другий – інфільтрації, а третій – теплопередачі. Еластичність оболонки призводить до "набрякання" клітини при зростанні  $V_k$ , зміні  $\varepsilon$ , тобто:  $F_k = f(V_k)$ ;  $\varepsilon = f(T_k; T_a; P_k; P_a)$ . Тепловий потік витрачається на нагрівання "сухої" частини, і частковий випар рідини:

$$Q_k = \int_0^{\tau} \int_0^V c_{Pc} \{ [1 - C_k(\tau)] V_k(\tau) \} \rho_c dV d\tau + \int_0^{\tau} \int_0^V c_{Pb} \cdot C_k(\tau) \cdot V_k(\tau) dV d\tau + \int_0^{\tau} \int_0^V q_v dV d\tau \quad (28)$$

II Другий етап. На другому етапі  $\tau_b < \tau \leq \tau_n$ ;  $P_a = P_b$ ;  $T_a = T_b$ . Співвідношення (26) і (27) характерні тільки на незначному відрізку часу II етапу. В основному витримка необхідна для здійснення масопереносних процесів.

**III Третій етап.** На третьому етапі  $\tau_n < \tau \leq \tau_{ак}$ ;  $P_e > P_a \geq P_0$ ;  $T_e \geq T_a \geq T_0$  відбувається різке скидання тиску, що приводить до інтенсивного виходу вмісту через пори клітинної оболонки. Ступінь розриву клітинних оболонок у всій реакційній масі визначає ступінь активації. За певних умов можливе збільшення діаметра пор у клітинних стінках, а також частковий або повний розрив оболонки. Для цього випадку рішення подано у вигляді моделі напруженого стану сферичної оболонки з наскрізними отворами.

Запропонована математична модель дозволяє визначити напрям досліджень у макроділянці, до яких відносять параметри, що управляють процесом та у такий спосіб визначають завдання експериментальних досліджень. Ключовим є третій етап. Система має дві фази, які розділяються оболонкою клітини, що має канали. Зовнішні силові поля в стані істотно змінювати параметри в дисперсній фазі стосовно їхніх початкових значень. При ступеневій зміні параметрів у фазі 1, що нестиска, рівновага порушується. Наприклад, при різкому зниженні тиску у фазі 1 мембрана або оболонка відчують силову дію рідини фази 2, що призводить до збільшення потоку через отвори. Якщо процес зміни тиску проходить повільно, тоді релаксація фази 2 пройде без ушкоджень оболонки. При миттєвому зниженні тиску у фазі 1 може відбутися як потужний викид рідини із клітки, так і розрив оболонки, мембрани. По суті, вирішувати треба механічну задачу.

У розділі обговорюються результати досліджень пелет, отриманих із кавового шламу. Експериментально встановлена їхня температура горіння – 515 °С, і теплотворна здатність – 17 МДж/кг.

**У дев'ятому розділі** «Інженерні методи розрахунку й оптимізації інноваційних розробок» різноманітні завдання, розглянуті вище, класифіковані. До групи прямих відносять задачі з теплового розрахунку апаратів на основі двофазних термосифонів, (ТМУ), мікрохвильових екстракторів кави (МЕК) і олії (МЕО). Математичні моделі таких завдань ставляться до класу сполучених, тепломасоаеродинамічних. Це завдання складного теплообміну, як правило, кондуктивно-конвективного, масообміну зі специфічними гідродинамічними потоками, з одночасним виділенням або поглинанням теплоти та маси продукту внутрішніми фазовими джерелами. Друга група - зворотні задачі, покладені в основу методів енергетичного менеджменту. Це завдання системного аналізу, пов'язані з удосконаленням діючих теплотехнологічних схем. Тут завжди відомі наслідки, а шуканими величинами є причини, які призводять до перевитрати енергії.

Пропонується розрахунково-експериментальний метод рішення зворотних задач в енергоменеджменті та принцип суперпозиції при розрахунку теплового режиму окремих елементів технологічного апарата, але обов'язково врахувати можливий тепловий зв'язок між апаратами й навколишнім середовищем. Тобто, зберігши системний підхід, спростити завдання на рівні окремих (z) елементів апарата. У такій постановці сумарний тепловий потік від усіх n термічних апаратів у цеху визначається співвідношенням

$$Q = \sum_1^n \sum_1^z q_j^i (F_K)^i_j .$$

Головне завдання проектування ТМУ пов'язане з розрахунком теплопередачі в системі "гарячий потік - ТС - холодний потік". Метод покоординатного спуску

Гаусса-Зайделя надійно працює при монотонній зміні функцій, а ТС до сьогодні є порівняно новими елементами. Тому достатній для завдань синтезу теплових схем типорозмірний ряд ТС поки не розроблений. Все це свідчить, що завдання оптимізації енерготехнологічних систем на сьогодні знаходиться тільки в стадії досліджень. Існує уявлення, що раціональною при проведенні оптимізаційних задач може бути така схема. За певних комбінацій варійованих параметрів устанавлюється частковий техніко-економічний оптимум. Аналізуючи результат, обирається наступна комбінація параметрів. Так поступово йде наближення до ймовірного значення глобального оптимуму. Основними параметрами, які характеризують теплотехнічну ефективність повітропідігрівача на ТС, вважаються температурний ККД і число одиниць переносу (B):

$$\eta = \frac{t_{Г'}' - t_{Г''}}{t_{Г'}' - t_{Б}} = f \left[ \frac{W_{Г}}{W_{X}} \right]; B = \frac{KF}{W_{Г}} = f \left[ \frac{W_{Г}}{W_{X}} \right] \quad (29)$$

У результаті комп'ютерного експерименту встановлено вплив числа ТС ( $n$ ), числа рядів ТС ( $Z$ ), висоти зони випару ( $H_{л}$ ), поздовжнього ( $S_1$ ) і поперечного ( $S_2$ ) кроків між ТС на значення функціонала ( $\Phi$ ), що мав економічний характер (рис. 21).

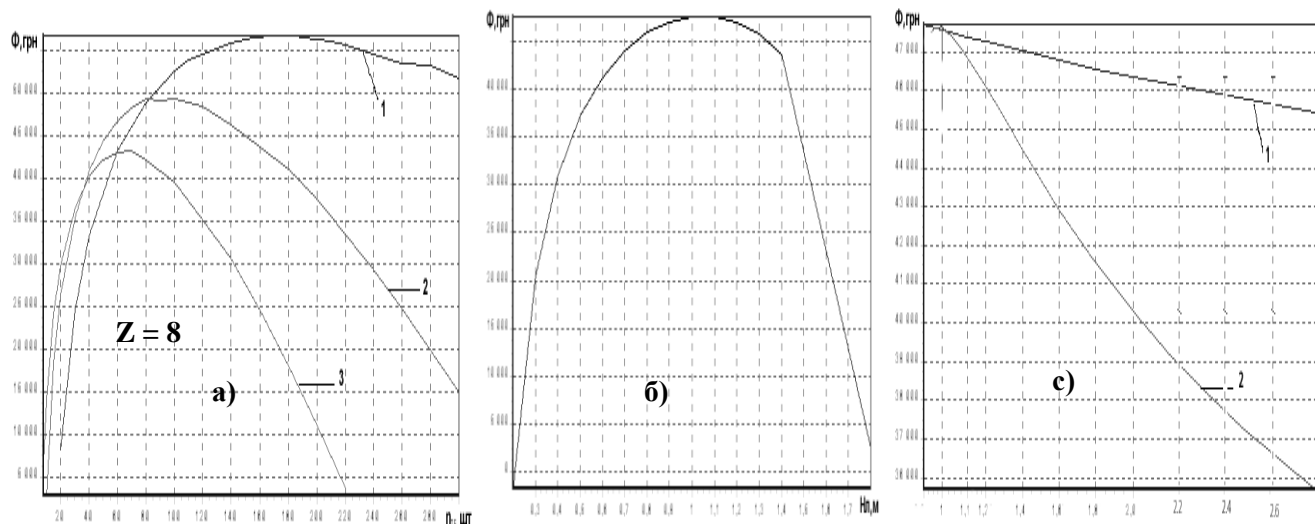


Рис. 21. Залежність функціонала від а) - числа труб у ряді (висота ТС: 1- 2м, 2- 4м, 3- 6м), б) - від висоти ТС ( $H_{л}$ ), в) - від  $S_1$  і  $S_2$  ( $1 - S_1/S_0$ ,  $2 - S_2/S_0$ )

Більш стабільні значення функціонала для висоти ТС 2 м. При такій висоті функціонал менш чутливий до числа ТС в одному ряді (рис. 21). При висотах ТС 4...6 м оптимум функціонала яскраво виражений (рис. 21), що свідчить про необхідність ретельного аналізу таких апаратів за кількістю ТС в одному ряді. Більше того, висота 2 м характеризується й найвищими значеннями функціонала. Істотно впливає на значення функціонала компонування ТС. Найбільшим числам  $\Phi$  відповідають мінімально можливі значення відстані між ТС ( $S_0$ ). Причому найбільш критичними є поперечні зазори (рис. 21, в). Це пояснюється тим, що саме ( $S_2$ ) формує гідродинамічну картину обтікання потоком ТС. Зменшення ( $S_2$ ) приводить до зменшення площі живого перетину й до росту швидкості руху потоку.

Тому при конструюванні повітропідігрівника крок ( $S_2$ ) приймався мінімальним, він регламентувався конструкцією трубної дошки.

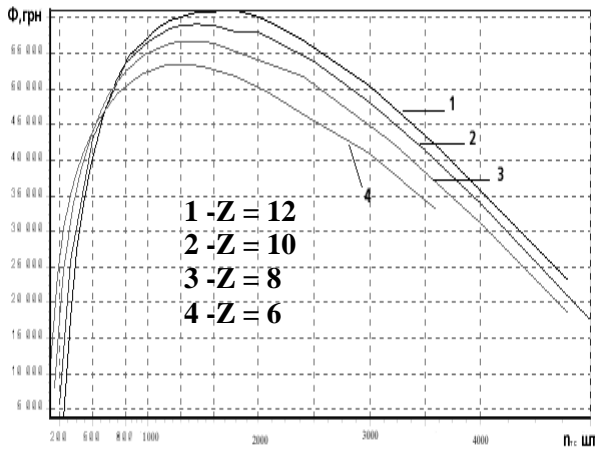


Рис. 22. Залежність  $\Phi = f(n)$ .

При зростанні поздовжнього кроку ( $S_2$ ) структура течії повітря в міжтрубному просторі змінюється, однак, ступінь такого впливу значно менший, ніж зниження швидкості потоку, викликане зменшенням ( $S_1$ ). Менш значущим виявився вплив на функціонал значення числа рядів (рис. 22). У розділі наведено методику розрахунку екстрактора олії, мета якої визначення продуктивності, тривалості процесу та енергетичних витрат.

Розроблено методику розрахунку й оптимізації безперервного протиточного екстрактора системи «кавова сировина - вода». Проведений комп'ютерний експеримент показав, що питомі витрати енергії становлять 220...370 кДж на 1 кг вилучених сухих речовин. Найбільший вплив на процес екстрагування під впливом МХ-поля виявляють: вихідна потужність магнетронів, продуктивності по сировині й екстрагенту та висота шару сировини в масообмінному модулі. Результати використані для формулювання завдання оптимізації МХ-екстрактора. При послідовному розрахунку концентраційних і температурних полів локальної зони вхідні концентрація та температура наступної локальної зони є вихідними концентрацій і температур попередньої при фіксованому часі. А початковий розподіл концентрації й температури в потоці сировини локальної зони на даний момент часу є полями концентрації й температури цієї ж локальної зони в попередній момент часу. Комп'ютерний експеримент проводився з використанням прикладних програмних пакетів Microsoft Excel, Delphi (об'єктно-орієнтованої мови програмування). Програма «EXTRACTOR.1» написана мовою програмування Pascal, у середовищі Borland Delphi 7.0.

Збільшення товщини шару  $\delta$  сировини в касеті в 3,5 рази приводить до збільшення концентрації на виході в 1,8 разів. Отже, завданням оптимізації є узгодження потужності МХ-генераторів, продуктивності екстрактора за екстрагентом, за висотою шару сировини в касеті при постійній продуктивності за сировиною. На виході з екстрактора шлам повинен бути максимально вичерпаний, що забезпечить максимальну концентрацію готового продукту на виході. У дослідженому діапазоні зростання температури незначно збільшує кількість кінцевого продукту. Більш вагомим фактором є витрата екстрагенту, збільшення витрати якого в 3 рази приводить до зростання продуктивності з готового продукту в 1,3 рази. Необхідно погоджувати потужність електромагнітного поля з витратою шламу, а при його постійній витраті з висотою матеріалу в касеті та зі швидкістю руху масообмінних модулів. При зростанні кінцевої концентрації екстрагенту питома витрата енергії падає. При збільшенні витрати шламу в 3 рази питома витрата енергії на 1 кг кінцевого продукту при  $G_3 = 20$  кг/год зменшується в 1,5 рази. При збільшенні витрати екстрагента в 3 рази питома витрата енергії збільшується в 1,5 рази.

З огляду на структуру розробленої математичної моделі екстрактора викорис-

таний метод оптимізації параметрів установки, заснований на дослідженні просторів параметрів  $R_n$  шляхом рівномірного його заповнення точками  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , по всьому просторі. У кожній з  $x_j$  обчислюється значення цільової функції  $Z$ . Отримана інформація буде використана в процедурі вдосконалення завдання й оптимізації рішення. З економічної точки зору доцільно врахувати річне споживання електроенергії, капітальні витрати на виготовлення установки й вартість продукції в критерії оптимізації. Для спрощення задачі має сенс урахувати в критерії тільки змінну складову:

$$Z = \max (Ц \cdot D - K_y - C_{ey} \cdot P_{ey}), \quad (30)$$

де  $P_{ey}$  – річне споживання енергії, кВт\*ч;  $C_{ey}$  – вартість одиниці енергії, грн/кВт\*ч;  $K_y$  – вартість установки, грн;  $D$  – кількість сировини зекономленої за рахунок додаткового добування зі шламу, що розраховується по формулі:  $D = G_{ocm} \cdot (C_n - C_{ocm}) \cdot k_{зв}$  ( $k_{зв}$  – коефіцієнт що враховує втрати екстрактивних речовин зі шламом по відношенню до вихідної сировини (сирим зернам кави) і дорівнює 1,3). Оптимізація установки - це пошук максимального значення цільової функції  $Z$ . З функції оптимізації  $Z$  (30) і математичних моделей установки, наведених вище, визначено, що параметрами, які оптимізуються є: висота шару шламу в касеті  $\delta$ , температура нагрівання екстрагенту  $t$ , гідромодуль  $q$ , розміри масобмінного модуля ( $L, B, h$ ), кількість модулів по висоті установки  $n$ .

Для розв'язання задачі обрано метод покоординатного спуску Гаусса-Зейделя, який є класичним ітераційним методом. Метод зводить задачу пошуку найбільшого значення функції декількох змінних до багаторазового рішення одномірних задач оптимізації.

Було використано програму «EXTRACTOR.2», що написана мовою програмування Pascal, у середовищі Borland Delphi 7.0.

Реалізація алгоритму покоординатного спуску здійснювалася за кожною координатою локального оптимуму. Визначалися поля концентрацій в екстракторі (рис. 23). Тут по осі ординат відкладена кількість масообмінних модулів  $n$ , а по осі абсцис: (1) – зміна концентрації рідкої фази (екстрагенту) і (2) – твердої фази по висоті екстрактора  $H$ .

Для аналізу впливу конструктивних параметрів: довжини масообмінного модуля  $L$ , ширини масообмінного модуля  $B$ , висоти масообмінного модуля  $h$  і кількості масообмінних модулів  $n$  на техніко-економічні показники проводився комп'ютерний експеримент. Типовий приклад розрахунку наведено на рис. 23. Видно, що максимум економічної ефективності функціонала досягає при значенні довжини масообмінного модуля екстрактора 0,94 м.

Надалі для апаратів із модуля довжиною 0,9 м проведено розрахунки функціонала при різній ширині модуля. Аналогічно проведено аналіз впливу всіх параметрів, що варіюються, за кожною координатою локального оптимуму. Максимум функціонала досягається при значенні температури екстрагенту 85 °С. Аналіз варіантів наведено у табл. 2.

У результаті оптимізаційних процедур виявлено загальні тенденції впливу продуктивності й потужності МХ-інтенсифікаторів на конструктивні й економічні параметри. Зі збільшенням продуктивності установки росте функціонал економічної ефективності  $Z$  внаслідок раціонального використання підведеної енергії. При збі-

льшенні потужності в 4,5 разів показник економічної ефективності зростає в 8 разів. За підсумками оптимізації розроблено типорозмірний ряд МХ-екстракторів безперервної дії (табл.2).

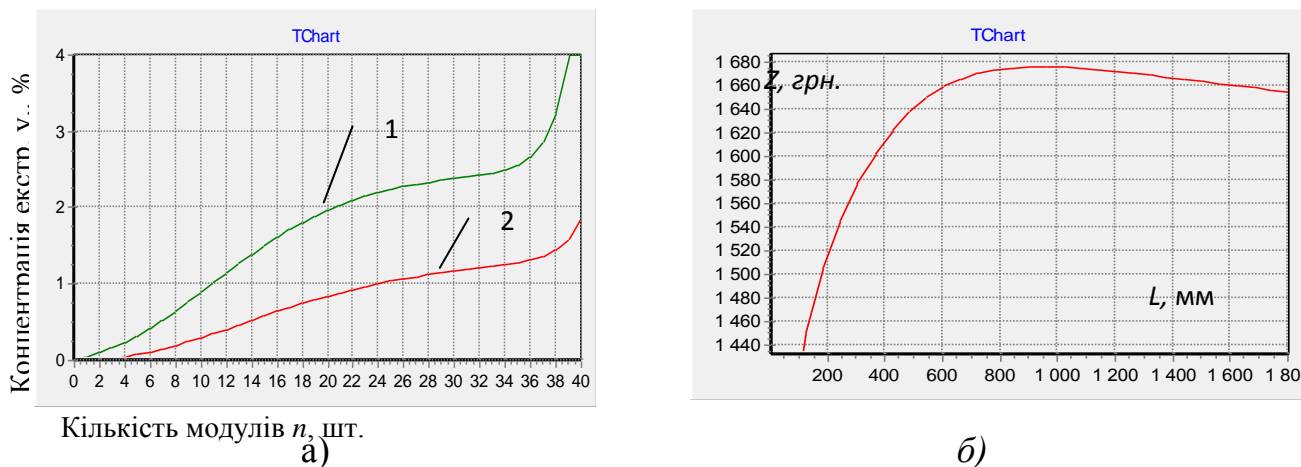


Рис. 23. а) Розподіл концентрації екстрактивних речовин по модулях відповідному локальному максимуму  $Z$  по координаті  $L$ ; б) Вплив довжини масообмінного модуля  $L$  на функціонал економічної ефективності  $Z$ .

Таблиця 2

### Результати оптимізації

Варіант	1	2	3	4	5
Продуктивність за сировиною $G_C$ , кг/ч	6	12	24	48	96
Продуктивність за екстрагентом (воді) $G_E$ , л/ч	7,2	48	72	124	288
Кінцева температура екстрагента $t_k$ , °C	60	90	85	85	96
Потужність, кВт/кг	1,02	4,4	6,1	10,5	26
Функціонал ефективності $Z$ , грн/ зміна	168	826	1696	3400	6843
Концентрація екстрагента $X_E$ , %	2,14	1,6	1,67	1,68	1,61
Капітальні витрати, тис. грн	30	85	160	300	550
Строк окупності, років	0,41	0,23	0,21	0,20	0,18

У десятому розділі «Впровадження інноваційних проектів у харчоконцентратне виробництво» на основі системного аналізу показало, що найбільша потужність втрат теплової енергії характерна для організаційних проектів (рис. 24).



Рис. 24. Порівняння енергетичної ефективності проектів

Відчутна ефективність отримана від впровадження ТМУ (рис. 25) у лінію розчинної кави. Результати стендових випробувань апарата оброблені у вигляді залежностей ККД і числа одиниць переносу від співвідношення повних теплоємностей гарячого й холодного потоків.



ТМУ експлуатується в технології розчинної кави підприємства «Енні Фудз» з 1999 р.

Знижує витрату палива на 10...25 %.

Вилучає з газових викидів від 40 до 90 % пилу продукту.

Складається з 200 термосифонів.

Теплова потужність модуля 0,1...0,5 МВт.

Габаритні розміри: 1650x2000x600.

Рис.25. Впровадження тепломасоутилізатора.

Обґрунтовано типорозмірний ряд повітропідігрівників на термосифонах.

Визначені техніко-економічні показники використання ТМУ в сушарках А1-ОР4, РЗ-ОСС, НІМА та ін. Строк окупності ТМУ тільки за рахунок скорочення витрати палива не перевищує 1 року. Якщо враховувати ефект від повернення в технологію пилу продукту (цукру, молока, кави), то строк окупності скоротиться, як мінімум, удвічі. Запропоновано проект лінії з переробки шламу

З вологого кавового шламу, за допомогою центрифуги вдається видалити до 50 % вологи. Вологу, що залишилася, видаляємо в сушильній установці. Сухий шлам у прес-грануляторі формується в пелети. Частину пелет буде використано для сушіння вологого шламу. Інша частина забезпечує потреби системи опалення підприємства й частково технологію.

Ключовим апаратом схеми є МХ-екстрактор (рис. 26).



Споживана потужність, кВт	≤ 7,3 кВт
Робочий обсяг, дм <sup>3</sup>	180
Магнетрони (0,9 кВт), шт.	5
Габаритні розміри (д/ш/в), м:	0,52/0,68/2,05
Продуктивність по сировині, кг/ч	≤ 24

Корпус виконаний з каскаду резонаторних камер з магнетронами. Дно верхніх камер з'єднується з поверхнею нижніх камер шлюзовими каналами. Через ці канали переміщуються за допомогою домкрата блоки касет із сировиною. Методом калориметру при стендових випробувань МХ екстрактора визначено потужність МХ поля в камерах, касетах та шлюзах (рис.27).

Рис.26. МХ екстрактор безперервної дії.

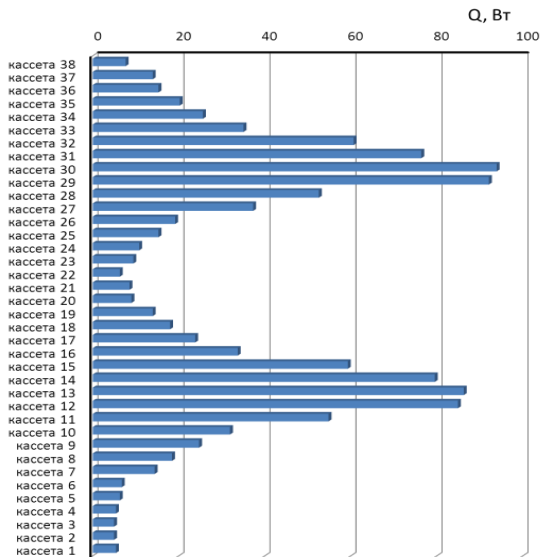


Рис.27. Діаграма потоків енергії.

Кавовий екстракт, отриманий в експериментальному зразку апарата, був досліджений в лабораторії підприємства ПАТ «Енні Фудз» і отримав позитивні оцінки за органолептичними, фізико-хімічними, мікробіологічними показниками та показниками безпеки продукту. На основі розробленої програми «EXTRACTOR.2» обґрунтовані параметри типорозмірного ряду МХ-екстракторів кави і запропонована режимна карта їхньої роботи.

Розроблено конструкцію мікрохвильового екстрактора олії, що при питомій потужності МХ- поля 6...0,15 кВт/кг переробляє до 6 кг шламу й забезпечує 13...20 % виходу олії кави. Тривалість екстрагування – 30...90 хв.

Знежирений шлам подається на лінію виробництва пелет (ЛП). Пелети можуть слугувати паливом на підприємстві, зокрема в сушарці шламу лінії ЛП. Надлишок пелет може реалізовуватися й давати прибуток. Проведено випробування дослідного зразка стрічкової ІЧ-сушарки шламу. Установа складається з 3 модулів, потужність випромінювачів кожного модуля плавно регулюється в межах 30...100 %. Установлено режими, при яких енерговитрати становили 3,1... 3,2 МДж на 1 кг вилученої вологи. Наведені вище проекти дозволили модернізувати технологію виробництва розчинної кави (рис.28).

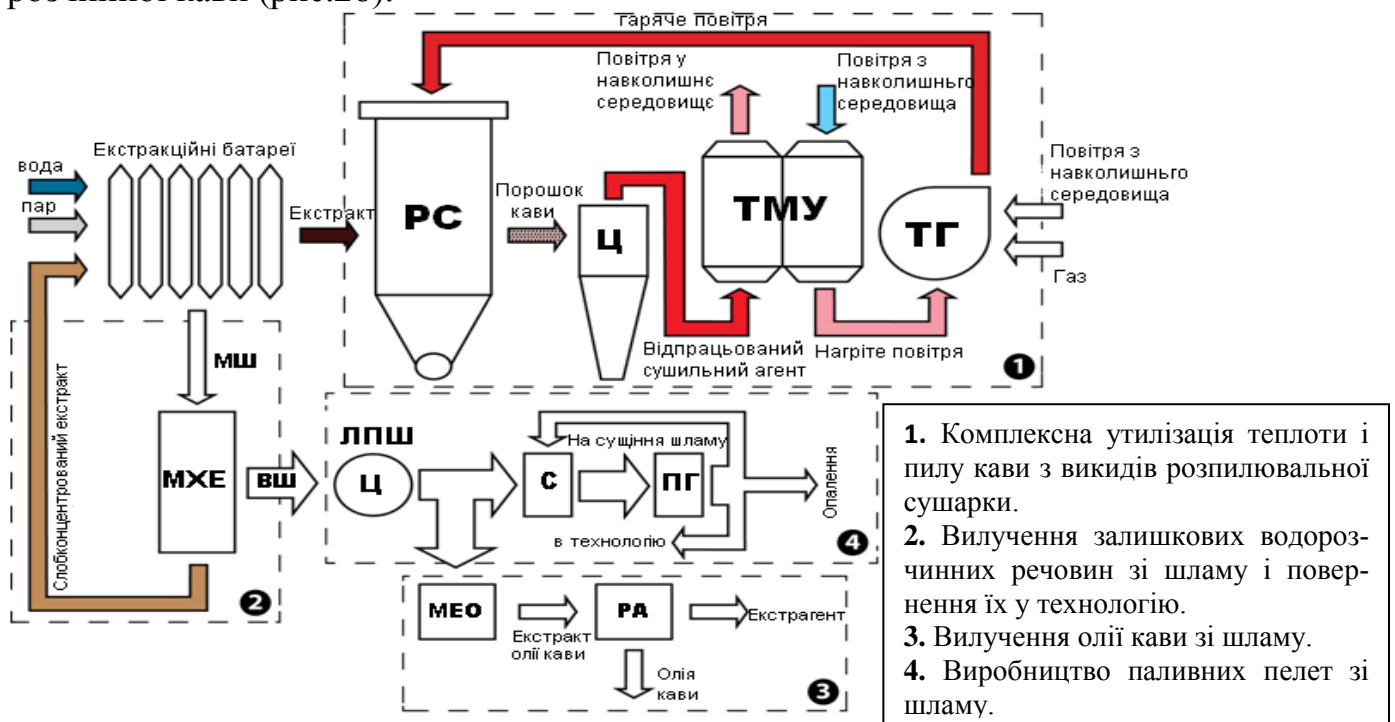


Рис. 28. Інноваційна тепло технологія розчинної кави

Наведено результати аналізу та дегустації принципово нових зразків неенергоємних концентратів рідкої кави, які були отримані в мікрохвильовій вакуум-випарній установці. Температура процесу становила 35...100 °С, а концентрація сухих речовин – 54...70 %. На основі отриманих концентратів купажовані нові продукти: «кава з цукром», «кава з коньяком», «кава з молоком», «кава з цукром і коньяком». Зразки одержали високу оцінку при дегустації.

У висновку обговорюються комерційна привабливість проектів, їх економічні, екологічні, технологічні, енергетичні й соціальні аспекти. Відзначаються бар'єри повномасштабного впровадження нових зразків продуктів і техніки. Загальний висновок із проведених розробок полягає в тому, що мікрохвильові технології – новий метод виробництва кавопродуктів, що вигідно відрізняється.

У додатках подано Енергетичну програму харчоконцентратного виробництва, методики проектування тепломасоутилізаторів, мікрохвильових екстракторів, економічної оцінки організаційних і технічних заходів енергоменеджменту, розрахунок економічного ефекту від впровадження лінії виробництва олії кави. Наведено протоколи аналізу якості виробленої продукції (рідкий концентрат кави), скріншот головного вікна програми «EXTRACTOR.1» для проведення розрахунку параметрів процесу екстрагування, акти виробничих випробувань, впроваджень і дегустацій на підприємствах «ГАЛКА», «Укркава», «Енни Фудз».

## **ВИСНОВКИ**

В роботі сформульовано гіпотези, що технічною базою для удосконалення технологій ХК можуть стати сучасні способи ефективної теплопередачі: випарні термосифонного і електромагнітні генератори енергії. Створено наукові основи вдосконалення теплотехнологій сушіння, екстрагування і деструкції сировини та запропоновано інноваційне обладнання.

1. Методами енергетичного та екологічного менеджменту встановлено, що виробництво розчинної кави супроводжується втратами до 5 % сухих речовин (15,5 % від загальної кількості), до 80 % летючих ароматичних компонентів. Питомі витрати енергії складають до 50 МДж на 1 кг розчинної кави. Вихід цільового компоненту тільки 20 ... 33 % від маси сирих зерен. Викиди теплоносія з сушильного обладнання містять 0,055 г пилу порошку кави в 1м<sup>3</sup> теплоносія, а їх температура становить 105 °С. В результаті за рік з однієї сушильної установки втрачається: 8200 ГДж теплової енергії і 4560 кг готового продукту. Відходи виробництва – кавовий шлам є агресивним забруднювачем літосфери. Ці відходи містять до 4 % екстрактивних речовин, до 22 % масел і значна кількість інших цінних компонентів, вилучення яких має комерційну доцільність.

2. Запропонована і доведена гіпотеза синтезу системи комплексної утилізації теплоти і пилу харчового продукту з викидів сушильного обладнання. На основі положення граничного масопереносу сформульована тризонна модель, яка включає процес осадження пилу і конденсації пари (зона консолідації), процес розчинення шару пилу конденсатом (зона релаксації) і процес стікання розчину з поверхні термосифона (зона плинності). Ці моделі спільно з моделлю масообміну реагують з по-

током частинок пилю продукту стали основою теорії тепломасообміну паропилогазових потоків в термосифонних рекуператорах.

3. На основі феноменологічних підходів розвинена теплофізичних модель екстрагування в електромагнітному полі, обґрунтовані можливості інтенсифікації процесу в умовах бародифузії. Методами теорії подібності модель трансформована в критеріальну форму як для екстрагування в нерухомому шарі, так і для масопереносу в потоці екстрагента.

4. Комплексними експериментальними дослідженнями масопереносу в системі «кавова сировина - вода» підтверджено, що доцільно працювати в діапазонах витрат екстрагенту  $1,4 \cdot 10^{-6} \dots 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , і при значеннях товщини шару кавової сировини  $0,001 \dots 0,003 \text{ м}$  для ініціювання часткового псевдозрідження і забезпечення тонкошарових течій в шарі продукту. При збільшенні об'ємної витрати екстрагенту в 3 рази вихід екстрактивних речовин з кавового шламу підвищується на 35 %, а час екстрагування скорочується в 2 рази. Встановлено, що в умовах МХ поля з кавового шламу вилучається на 3 % більше олії, ніж в традиційних технологіях. В умовах МХ поля кращим екстрагентом є етанол. Полярні молекули етанолу підсилюють ефект бародифузії і сприяють інтенсивному масопереносу. Етанол, на відміну від гексану, сприяє додатковому переходу в екстракт ароматичних компонентів.

5. Створено комп'ютеризований експериментальний стенд і виконані комплексні дослідження впливів режимних параметрів на кінетику ІЧ сушіння кавового шламу та харчоконцентратів. Досягнуто швидкості видалення вологи у  $2,5 \text{ \%}/\text{хв}$ .

6. Розрахункові задачі класифіковані. Застосування системної оптимізації методами енергетичного менеджменту передбачає вирішення зворотних задач тепломасообміну. Розрахунок і оптимізація нових зразків техніки екстрагування передбачає рішення прямих задач тепломасообміну. Розроблено алгоритм розрахунку конструктивних параметрів тепломасоутилізатора. При оптимізації компоновання апарату, в якості цільової функції використаний економічний критерій. Комп'ютерним моделюванням встановлено ключові фактори, що впливають на техніко-економічні параметри. Для різних теплотехнологій АПК запропонований типорозмірний ряд підігрівачів повітря на термосифонах.

7. Розроблено алгоритми розрахунку і оптимізації мікрохвильових екстракторів кави і олії кави. Представлені процедури розрахунку теплофізичних, гідравлічних і масообмінних параметрів екстрактора. Обґрунтовано процедури оптимізації, розроблені відповідні програми розрахунку і виконаний комп'ютерний експеримент, на основі якого запропоновано типорозмірний ряд мікрохвильових екстракторів.

8. Сформульовано гіпотезу тристадійних процесів активації кавового шламу, технології баротермічної активації шламу. Гіпотеза обґрунтована математичною моделлю, підтверджена дослідними зразками. Розроблені технології передбачають поетапне вилучення з шламу водорозчинних речовин, олії, виробництво агропелет. Встановлено умови активації клітинної структури, механізми деструкції оболонки.

9. Запропоновані в роботі наукові положення доведені результатами випробувань устаткування, актами впровадження методик, зразків техніки і нових видів неенергоємних концентратів. Впроваджені і випробувані в умовах виробництва:

- Енергетична програма харчоконцентратна виробництва, в основі якої розроблена оригінальна розрахунково-експериментальна методика енергетичного аудиту об'єк-

тів, пріоритетні проекти вдосконалення теплотехнологій харчоконцентратного виробництва;

- система комплексної утилізації теплоти і пилу харчового продукту з аерозольних викидів сушарки. В основі системи вперше використаний оригінальний апарат - тепломасоутилізатор, який на 18 ... 22 % знижує витрату палива і вловлює до 90 % пилу порошку кави;

- мікрохвильовий екстрактор кави, який в 5 ... 7 разів скорочує тривалість процесу, забезпечує роботу при атмосферному тиску, при температурі до 100 °С і збільшенні виходу цільових компонентів на 10 ... 12 %;

- технологія переробки відходів – кавового шламу.

На 1 кг перероблених зерен впровадження тепломасоутилізатора дає прибуток 1,45 грн., мікрохвильового предекстрактора - 5,3 грн., екстрактора олії кави – 60 грн., а виробництво паливних пелет - 1,5 грн. Сумарний ефект на 1 кг зерен (в залежності від кількості реалізованих проектів) від 1,5 грн/кг до 71 грн/кг. Термін окупності проектів в межах 1 року. По галузі ефект за рік становить від 2,3 млн.грн. до 112,2 млн.грн.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ. Монографії**

1. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб [Текст] / О.Г. Бурдо, Г.Ф. Смирнов, С.Г. Терзиев, А.В. Зыков – Одесса: ИНВАЦ, 2014 – 376 с. *(здобувачем у співавторстві написано глави 3, 4, 9).*
2. Процессы переработки кофейного шлама [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская– Киев: «ЭнтерПринт», 2014 – 228 с. *(здобувачем у співавторстві написано глави 1 - 10).*

### **Статті в фахових виданнях та наукометричних виданнях**

3. The Nanotechnological Innovation in Food Industry [Text] / O.G. Burdo, A. V. Zykov, S. G. Terziev, N.V. Ruzhitskaya // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) – 2016 - Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150.
4. Бурдо, О.Г. Энергетика экоиндустрии производства пищевых концентратов [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Ю.О. Левтринская // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» / Кишинев, 2015 – №3 (29) – С.112-118.
5. Бурдо, О.Г. Энергетические проблемы экономики Украины [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Ю.О. Левтринская // Науковий журнал Энергетика: економіка, технології, екологія / Киев, 2015 – №4 (42) – С.66-73.
6. Терзиев, С.Г. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, И.И. Яровой, А.А. Борщ // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» – Кишинев, 2012г. – №2 (19) – С.69-79.
7. Терзиев, С.Г. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energetici regionale (Проблемы региональной энергетики)» / 2015 – №1 (27) – С.79-86.
8. Терзиев, С.Г. Використання мікрохвильових технологій у процесах екстрагування олії кави [Текст] / С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-т – Мелітополь, 2015. – Вип. 15. Т. 1. – С. 175-180.

9. Терзиев, С.Г. Инновационные теплотехнологии производства кофепродуктов [Текст] / С.Г. Терзиев // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2015. – Вип. 47, Т.1. – С. 26-33.
10. Терзиев, С.Г. Совершенствование теплотехнологий производства кофе [Текст] / С.Г. Терзиев, О.Г. Бурдо, Ю.О. Левтринская, // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2015. – Вип. 47, Т.2. – С. 81-87.
11. Терзиев, С.Г. Применение теории подобия в задачах экстрагирования в микроволновом поле [Текст] / С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 158-162.
12. Терзиев, С.Г. Повышение ресурсоэнергоэффективности технологии растворимого кофе [Текст] / С.Г. Терзиев// Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 195-199.
13. Терзиев, С.Г. Стендовые испытания микроволнового экстрактора для производства кофепродуктов [Текст] / С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская, Н.В. Ружицкая // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.3., С. 80-84.
14. Терзиев, С.Г. Применение теории подобия в задачах экстрагирования в микроволновом поле [Текст] / С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 158-162.
15. Использование микроволновых технологий в процессах комплексной переработки шлама кофе [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская, О.Г. Бурдо // Харчова наука і технологія. – 2014. – №3(28) – С. 85-88.
16. Терзиев, С.Г. Этапы внедрения инновационных теплотехнологии в производство пищевых концентратов [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, А.А. Борщ // Щоквартальний науково-практичний журнал «ІТЕ» Національний технічний університет «ХПІ», – Харків, 2014. – №4. – С.138-142.
17. Неэнергоёмкие пищевые добавки, натуральные красители и ароматизаторы [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В.Ружицкая, Д.А. Харенко // Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 221-224.
18. Терзиев, С.Г. Энергетический аудит пищевого концентратного производства [Текст] / С.Г. Терзиев, А.А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 224-228.
19. Терзиев, С.Г. Кинетика экстрагирования из шлама кофе при микроволновом подводе энергии / С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская, Н.В. Ружицкая // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса. – 2014. – Вип. 46, Т.2. – С. 300-303.
20. Питомі витрати енергії при зневодненні харчової сировини в електромагнітному полі [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзієв, І.І. Яровий, А.А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 43, Т.1. – С. 44-48.
21. Терзієв, С.Г. Розробка енергоефективного екстрактору олії кави [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 43, Т.2. – С. 110-112.
22. Терзієв, С.Г. Кінетика процесу екстрагування олії зі шламу кави [Текст] / С.Г. Терзієв, Ружицька Н.В. // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-т – Мелітополь, 2013. – Вип. 13. Т. 1. – С. 130-134.
23. Зневоднення харчової сировини в електромагнітному полі [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзієв, І.І. Яровий, А.А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 44, Т.1. – С. 190-193.
24. Терзієв, С.Г. Узагальнення експериментальних досліджень екстрагування шламу кави [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 44, Т.2., С. 334-337.
25. Энергетический анализ пищевых нанотехнологий [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, Т.Л. Макиевская// Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.2. – С. 19-25.
26. Проблемы моделирования процессов обезвоживания сырья [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, И.И. Яровой, А.А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.1. – С. 4-8.
27. Терзиев, С.Г. Электродиффузионная модель тепломассопереноса в термосифонных аппаратах [Текст] / С.Г.Терзиев, О.М. Кураков // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.1. – С. 219-222.

28. Кінетика та статика екстрагування олії з відходів харчових виробництв [Текст] / С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька, В.М. Бандура, Л.М. Коляновська // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 42, Т.1. – С. 344-348.
29. Совершенствование энерготехнологий при производстве пищевых концентратов [Текст] / С.Г.Терзиєв, О.М. Кураков, А.А. Борщ, Т.Л. Макиевская // Щоквартальний науково-практичний журнал «ІТЕ» Національний технічний університет «ХПІ», – Харків, 2012. – №3. – С.32-36.
30. Утилизация тепловых и сырьевых ресурсов при производстве пищевых концентратов [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиєв, Н.В. Ружицкая., А.А. Борщ // Харчова наука і технологія. – 2012. – №1 – С. 107-111.
31. Терзиєв, С.Г. Системный анализ потоков сырья и энергетических ресурсов в технологиях пищевых концентратов [Текст] / С.Г. Терзиєв // Харчова наука і технологія. – 2011. – №1(14). – С. 98-102.
32. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання [Текст] / С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька, В.І. Саламаха, С.А. Малашевич // Наук. пр. ОНАХТ.- Одеса, 2011. – Вип. 40, Т.1. – С. 190-192.
33. Исследование процесса сушки кофейного шлама под действием инфракрасного излучения [Текст] / С.Г. Терзиєв, Н.В. Ружицкая., В.И. Саламаха, С.А. Малашевич // Наук. пр. ОНАХТ.- Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2., – С. 167-170.
34. Терзиєв, С.Г. Кинетика процесса экстрагирования в микроволновом поле [Текст] / С.Г. Терзиєв, Т.Л. Макиевская// Наук. пр. ОНАХТ.- Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 200 – 203.
35. Повышение эффективности использования энергии и сырьевых ресурсов при производстве растворимого кофе [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиєв, П.И. Светличный, Т.Л. Макиевская// Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 284-287.
36. Бурдо, О.Г. Параметрический ряд тепломассоутилизаторов для АПК [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиєв, О.М. Кураков // Наук. пр. ОНАХТ.- Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 324 – 328.
37. Терзиєв, С.Г. Теплоэнергетический аудит пищекоцентратного производства [Текст] / С.Г. Терзиєв, А.А. Борщ , С.А. Малашевич // Наук. пр. ОНАХТ.- Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 352-354.
38. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання / С.Г. Терзієв , Н.В. Ружицька, В.І. Саламаха, С.А. Малашевич // Праці/ Таврійський державний агротехнологічний університет – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11. Т. 6. – С. 153-158.
39. Кінетика ІЧ-сушіння шламу кави / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька, А.А. Борщ // Харчова наука і технологія. – 2011. – №4(17) – С. 96-99.
40. Терзієв, С.Г. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання / С.Г. Терзієв , С.А. Малашевич, Н.В. Ружицька // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнології ім. С.З. Гжицького, - Львів, 2011. – Т.13, № 4 (50), Ч. 4. – С. 131-134.
41. Терзиєв, С.Г. Математическое моделирование процессов переработки структурированных отходов в пищекоцентратном производстве [Текст] / С.Г. Терзиєв // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 132-136.
42. Мордынский, В.П. Исследование кинетики льдообразования при криоконцентрировании кофейного экстракта [Текст] / В.П. Мордынский, С.Г. Терзиєв// Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 155-158.
43. Переробка шламу в технологіях виробництва розчинної кави [Текст] / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзиєв, В.В. Шведов, Н.В. Ружицька // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 252-255.
44. Терзиєв, С.Г. Энергетический мониторинг пищекоцентратного производства [Текст] / С.Г. Терзиєв // Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2008. – Вип. 32. – С. 330-333.
45. Шведов, В.В. Энергоаудит и технологический аудит предприятий – основа создания режима энергосбережения [Текст] / В.В. Шведов, В.И. Саламаха, С.Г. Терзиєв// Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2008. – Вип. 32. – С. 333-336.

46. Терзиев, С.Г. Моделирование задач тепломассопереноса при взаимодействии дисперсных компонентов в аэрозольном потоке [Текст] / С.Г. Терзиев // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2006. – Вип. 28. – Т.2. – С. 182-186.
47. Бурдо, О.Г. Експериментальне моделювання процесу екстрагування із зерен кави [Текст] / О.Г. Бурдо, Ряшко Г.М., С.Г. Терзиев// Наук. пр. ОНАХТ.– Одеса, 2004. – Вип. 27. – С. 200-205.
48. Интенсификация термообработки неньютоновских пищевых жидкостей [Текст] / И.В. Безбах, С.Г. Терзиев, О.Г. Бурдо, А.К. Войтенко // Наукові праці ОДАХТ. – 2002. – Вип. 23. – С. 244-247.
49. Терзиев, С.Г. Стратегія розвитку та перспективи впровадження високих енерготехнологій в АПК [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев // Наукові праці ОДАХТ. – 1996. – Вип. 16. – С. 244-245.
50. Кінетика осадження і розчинення пилу харчового продукту на поверхні утилізатора [Текст] / С.Г. Терзиев, С.М. Перетяка, В.Я. Гамоліч, О.Г. Бурдо // Наукові праці ОДАХТ. – Одеса. – 1994. – Вип. 15. – С. 174-178.

#### **Патенти України**

51. Пат. на винахід № 109743 Україна, (2015) B01D 11/02 Екстрактор безперервної дії для системи "тверде тіло-рідина" [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Т.Л. Макієвська, Н.В. Ружицька: заявник і патентовласник ОНАХТ. – № a201407763; заявл. 25.06.2015; опубл. 25.09.2015, бюл. № 18. – 4 с.
52. Пат. на корисну модель № 97751 Україна, (2015) B01D 11/02 Екстрактор безперервної дії для системи "тверде тіло-рідина" [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Т.Л. Макієвська, Н.В. Ружицька: заявник і патентовласник ОНАХТ. – № u201407762; заявл. 10.07.2014; опубл. 10.04.2015, бюл. № 7. – 4 с.
53. Пат. на корисну модель №87503 Україна, (2013) C09B 61/00 Спосіб одержання комплексу олії, ароматичних та барвних речовин зі шламу кави [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицька: заявник і власник ОНАХТ. – № u 201310221; заявл. 19.08.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. №3. – 4 с.
54. Пат. на корисну модель №49941 Україна (2010) A23L 2/38, A23F 5/00. Композиція кавової суміші [Текст] / С.Г. Терзиев : заявник і власник С.Г. Терзиев – № u 2010 02291; заявл. 01.03.10; опубл. 11.05.10, Бюл. №9. – 4 с.
55. Пат. на винахід № 26470 Україна (1999) F26B 3/02 Спосіб утилізації тепла та пилу продукту при сушінні продукту [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Перетяка С.М., І.І. Плужніков, В.Я. Чернуха; заявник і власник ОНАХТ. – № u93111384; заявл. 16.03.1993; опубл. 11.10.1999, Бюл. № 6. – 4 с.
56. Пат. на винахід № 18030А Україна (1996) A23 1/01 Спосіб термообработки пищевых продуктов [Текст] / О.Г. Бурдо, А.И. Кныш, С.Г. Терзиев: заявитель и патентообладатель ОНАХТ. – № u 96093616; заявл. 19.09.1996, опубл. 17.06.97, Бюл. №5. – 4 с.

#### **Публікації в матеріалах міжнародних конференцій**

57. Механодиффузионный эффект – новое явление в тепломассопереносе [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура, И.И. Яровой Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF-XV, May 23-26, 2016 – Minsk, 2016. – С. 224-228.
58. Терзиев, С.Г. Повышение ресурсоэнергоэффективности технологии растворимого кофе [Електронний ресурс] / С.Г. Терзиев // Матеріали XV Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» 8 – 12 вересня 2014р. – Одеса, 2014. – С. 361-365.
59. Терзиев, С.Г. Оптимизация микроволновых экстракторов для производства кофепродуктов [Електронний ресурс] / С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская// Матеріали XV Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» 8 – 12 вересня 2014р. – Одеса, 2014. – С. 462-469.

60. Режимы и механизмы обезвоживания продуктов в электромагнитном поле [Электронный ресурс] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура, Н.В. Ружицкая. // Современные энерго-сберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ-14: Пятый Международный научно-практический симпозиум 23–26 сентября 2014 г.: сборник трудов. – Иваново, 2014. – С. 39-43.
61. Терзиев, С.Г. Энергоэкологический мониторинг использования вторичного сырья пищевого концентратного производства [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 198-199.
62. Бандура, В.Н. Программа развития энергетики АПК [Текст] / В.Н. Бандура, С.Г. Терзиев, А.К. Войтенко // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 179-180.
63. Бурдо, О.Г. Политика повышения эффективности использования энергии в пищевых технологиях [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 185-186.
64. Бурдо, О.Г. Энергетический мониторинг пищевых технологий [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, В.Н. Бандура // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 186-187.
65. Бурдо, О.Г. Энергия – инструмент управления производством в АПК [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 188-189.
66. Терзиев, С.Г. Этапы теплоэнергетического аудита на предприятиях АПК [Текст] / С.Г. Терзиев, А.А. Борщ // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 195-196.
67. Терзиев, С.Г. Теплоэнергетический аудит пищевого концентратного производства [Текст] / С.Г. Терзиев, А.К. Войтенко, А.А. Борщ // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості». – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 196-197.
68. Бурдо, О.Г. Эффекты наномасштабной бародиффузии в процессах переработки пищевого сырья [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Т.Л. Макиевская // Сборник материалов I Международной научно-практической конференции Химия, био- и нанотехнологии, экология и экономика в пищевой и косметической промышленности – Щелкино, 2013. – С. 247-252.
69. Терзиев, С.Г. Кинетика тепло- и массообменных процессов в технологии пищевых концентратов [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая, А.А. Борщ // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену 10-13 сентября 2012г, Минск.: тезисы докладов и сообщений. – Минск, 2012. – Т. 2, Ч. 1. – С. 162-165.
70. Бурдо, О.Г. Процессы переноса в тепловых трубах при длительной эксплуатации и проблема их ресурса [Текст] / О.Г. Бурдо, Г.Ф.Смирнов, С.Г. Терзиев // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену 10-13 сентября 2012г, Минск.: тезисы докладов и сообщений. – Минск, 2012. – Т. 1, Ч. 2. – С. 416-419.
71. Бурдо, О.Г. Теплоперенос при парообразовании на профилированных поверхностях низкотемпературных тепловых труб [Текст] / О.Г. Бурдо, Г.Ф.Смирнов, С.Г. Терзиев // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену 10-13 сентября 2012г, Минск.: тезисы докладов и сообщений. – Минск, 2012. – Т. 1, Ч. 2. – С. 420-422.
72. Бурдо, О.Г. Централизованное управление системой энергообеспечения [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Стратегія

- економічного розвитку харчової промисловості та забезпечення продовольчої безпеки країни» - Одеса: ОНАХТ, 2012 – С.235–236.
73. Бурдо, О.Г. Прогнозное моделирование развития отраслей АПК [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Стратегія економічного розвитку харчової промисловості та забезпечення продовольчої безпеки країни» - Одеса: ОНАХТ, 2012 – С.236-238.
  74. Терзиев, С.Г. Экономика энергетического менеджмента [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Стратегія економічного розвитку харчової промисловості та забезпечення продовольчої безпеки країни» - Одеса: ОНАХТ, 2012 – С.245-247.
  75. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, И.И. Яровой, Н.В. Ружицкая // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ-11: Четвертая Международная научно-практическая конференция 20 – 23 сентября 2011 г.: Труды конференции. – Том 1. – Москва, 2011. – С. 422-426.
  76. Burdo, O.G. Heat and Mass Transfer from Vapor-Dust-Gas Flow inside Thermal Syphon Exchanger [Text] / Burdo O.G., Terziev S.G., Smirnov G.F. // Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: VIII Minsk International Seminar: Proceedings, Minsk, Belarus, 12 – 15 September 2011. – P. 86-91.
  77. Наномасштабные подходы при переработке пищевого сырья [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, И.И.Яровой и др. // Высокие технологии, образование, промышленность. Сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», – Санкт-Петербург, «Издательство политехнического университета», 2011– Т.3. – С. 129-132.
  78. Терзієв, С.Г. Дослідження процесу сушіння шлему кави під дією інфрачервоного випромінювання [Текст] / С.Г. Терзієв , Ружицька Н.В. // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011 р. ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 92-93.
  79. Безбах, И.В. Кинетика процесса выпаривания пищевых жидкостей в термомеханическом агрегате на базе вращающегося термосифона [Текст] / И.В. Безбах, Омар Саид Ахмед, С.Г. Терзиев //Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2009. – Вип. 35., Т.2. – С.191-193.
  80. Терзієв, С.Г. Моделирование процесса выпаривания пищевых жидкостей в термомеханическом агрегате на базе вращающегося термосифона [Електронний ресурс] / Безбах И.В., Омар Саид Ахмед, С.Г. Терзиев// Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы энергетической эффективности пищевых и химических производств» – Одесса, 2009. – С. 274-276.
  81. Терзієв, С.Г. Энергетический мониторинг пищевого производства [Електронний ресурс]//Матеріали XII Міжнародної конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». – Одеса, 2008 – С. 55-58.
  82. Burdo, O.G. Processing of Food Products with Using of Heat Pipes / O.G.Burdo, S.G.Terziev, E.A. Kovalenko // Biochimie și Biotehnologii în Industria Alimentară: I – Simpozion Internațional 6-9 noiembrie 2002: Materialele.– Chișinău, 2002. – P. 166-169.
  83. Пути совершенствования теплотехнологий сушки в АПК [Текст] / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзиев, А.В. Зыков, И.В. Безбах // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): 1-я Международная конференция: Труды. – Т.4. – Москва, 2002 – С. 153-156.
  84. Бурдо, О.Г Сопряженные процессы тепломассопереноса и аэродинамики в термосифонных аппаратах [Текст] / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзиев, Аида Амор // Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике: Сборник материалов международной научно-практической конференции, 23 – 26 октября 2000г. – Киев, 2000. – С. 82 – 84

85. The new ways of organization heat transfer in food industry apparatuses [Text] / О.Г. Бурдо , Е.А. Kovalenko, A.L. Knuish, S.G. Terzиеv // Proc. 5<sup>th</sup> International Heat Pipes symposium.-Melbourne (Australia).-1997.
86. Бурдо, О.Г. Тепломассоперенос в утилизаторах теплоты паропылегазовых выбросов пищевых производств [Текст] / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзиев, С.Н. Перетяка // III Минский междунар. Форум по тепломассообмену, 20 – 24 мая 1996г.: Т. X, Ч. 1. – Минск, 1996. – С. 173-177.
87. Condensation water vapour out of the dust-vapour-gas flow on the nellow beam finned heat pipes [Text] / O. Burdo, S. Peretyaka, S. Terzиеv // International conference on Heat transfer with change phase, Kielse, Poland, 1996.
88. The new ways of organization heat transfer in food industry apparatuses [Text] / О.Г. Бурдо , Knuish A.I., Terzиеv S.G. // Congress CHISA-96, Pragua, 1996.
89. Energy-Saving Food Technologies on Heat Pipes Exchangers Basis [Text] / O. Burdo, S. Terzиеv, S. Peretyaka // 1X International Heat Pipe Conference May 1-5, 1995, Albuquerque, USA.
90. Heat recovery Apparatus on Heat Pipes for Food Industries [Text] / О.Г. Бурдо , С.Г. Терзиев, И.М. Вискалова, Мяо Юнсян // 8 Int. Heat Pipe Conf.-Beijing (China), 1992, E-P-75.

#### **Тези доповідей у матеріалах наукових конференцій**

91. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г., Терзиев, И.И. Яровой, А.А. Борщ // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, – Воронеж, 2013. – № 3 (57) – С. 62-65.
92. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле [Электронне джерело] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, И.И. Яровой, А.А. Борщ // Моделирование энергоинформационных процессов/ Сборник статей I международной научно-практической интернет-конференции (10-15.12.2012). - Воронеж. гос. гн-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – С.56-62.
93. Терзиев, С.Г. Теплоэнергетический аудит пищекомбината [Текст] / С.Г. Терзиев, А.А. Борщ // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» 19 грудня 2012 р.: тези доп. – Одеса, 2012. – С. 33.
94. Бурдо, О.Г. Центр управления системой энергопотребления [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» 19 грудня 2012 р.: тези доп. – Одеса, 2012. – С. 21.
95. Терзиев, С.Г. Эффективные технологии утилизации отходов производства кофепродуктов [Текст] / С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» 19 грудня 2012 р.: тези доп. – Одеса, 2012. – С. 20.
96. Бурдо, О.Г. Метод прогнозирования развития отраслей АПК [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружицкая. // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» 19 грудня 2012 р.: тези доп. – Одеса, 2012. – С. 18.
97. Бурдо, О.Г. Режимы экстрагирования в микроволновом поле [Текст] / О.Г. Бурдо, В.В.Шведов, С.Г. Терзиев// Микроволновые технологии в нар. хозяйстве. Внедрение. Перспективы.– Вып.5 – 2002.
98. Соделирование прочесов в термомеханических аппаратах для дисперсных сред [Текст] / О.Г. Бурдо, Л.Г. Бандурина, С. Гайда, С.Г. Терзиев // “Вибротехнология-97” механическая обработка дисперсных (сыпучих) материалов и сред, 1997, Одесса, – С. 111-113.
99. Перетяка, С.Н.. Пылечистка и утилизация теплоты при сушке пищевых продуктов [Текст] / С.Н. Перетяка, А.И. Кныш, С.Г. Терзиев// Междунар. конф. “Экология и тепло-техника”, Днепропетровск, 1996.
100. Терзиев, С.Г. Економія тепла в технологічних процесах харчової промисловості [Текст] / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев // Конф. “Стан енергетики і енергозбереження та перспективи їх розвитку в харчовій промисловості”, Одеса, 1996.
101. Терзиев, С.Г. Энергоэкологические проблемы в агропромышленной сфере [Текст] / С.Г. Терзиев, С. Гайда, О.Г. Бурдо // Людина та навколишнє середовище: проблеми безпе-

- первної екологічної освіти в ВУЗах: V Науково-метод. конф. 16 – 18 вересня 1996р.: Збірник наук. праць. – Одеса, 1996. – С. 83-84.
102. Гамолич, В.Я. Анализ энерготехнологий пищевых производств методом теории графов [Текст] / В.Я. Гамолич, С.Г. Терзиев, В.Н. Халайджи // Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: 9 Міжнародна конференція, 10-13 вересня 1996 р.: тези доп. – Одеса, 1996. – С. 30.
103. Станевский, О.Л. Системный анализ энерготехнологий пищекоцентрадного производства [Текст] / О.Л. Станевский, С.Н. Перетяка, С.Г. Терзиев // Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: 9 Міжнародна конференція, 10-13 вересня 1996 р.: тези доп. – Одеса, 1996. – С. 31.
104. Шведов, В. В. Обоснование безотходной технологии производства растворимого кофе [Текст] / В.В. Шведов, П.И. Светличный, С.Г. Терзиев // Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв: 9 Міжнародна конференція, 10-13 вересня 1996 р.: тези доп. – Одеса, 1996. – С. 35.
105. Терзиев, С.Г. Энергетический аудит пищекоцентрадных технологий [Текст] / С.Г. Терзиев, С.Н. Перетяка, О.Г. Бурдо // Людина та навколишнє середовище: проблеми безпервної екологічної освіти в ВУЗах: V Науково-метод. конф. 16 – 18 вересня 1996р.: Збірник наук. праць. – Одеса, 1996. – С. 119-120.
106. Активация кофейного шлама с целью получения связующего вещества при производстве строительных материалов [Текст] / О.Г. Бурдо, В.В. Шведов, Л.Г. Бандурина, С.Г. Терзиев // “Вибротехнология-95” по измельчению и активации, 1995, Одесса.
107. Бурдо, О.Г. Моделирование процессов активации связывающих свойств шлама [Текст] / О.Г. Бурдо, В.В. Шведов, С.Г. Терзиев // “Вибротехнология-95” по измельчению и активации, 1995, Одесса.
108. Перспективи використання двухфазних теплопередаючих систем в енергозберігаючих термотехнологіях харчових виробництв [Текст] / О.Г. Бурдо, С.М. Перетяка, С.Г. Терзієв, О.І. Книш // Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість: Всеукраїнська науково-технічна конф., 17 – 20 жовтня 1995р.: тези доп. – Київ, 1995. – С. 442.
109. Проблемы ресурсоэнергосбережения и экологии при сушке пищевых продуктов [Текст] / О.Г. Бурдо, Перетяка С.М., О.І. Книш, С.Г. Терзієв // Междунар. конф. “Экология-продукты питания-здоровье”, Одесса, 1995 – С. 25.
110. Системный анализ энерготехнологий пищевых производств/ С.Г. Терзиев, В. Я. Гамолич, С.Г. Гайда, О.Г. Бурдо / Междунар. конф. “Экология-продукты питания-здоровье”, Одесса, 1995 – С. 24.
111. Гамолич, В.Я. Трехзонная модель адгезионного взаимодействия пыли продукта с поверхностью конденсации [Текст] / Гамолич В.Я., С.Н. Перетяка, С.Г. Терзиев// 55-я научная конф. ОГАПТ, 11 – 14 апреля 1995г.: тезисы докл. – Одесса, 1995. – С. 237.

#### **Особистий внесок здобувача в наукових роботах:**

- 1) *Здобувачем в співавторстві написано розділи 3, 7, 8, 9, 11 монографії «Иновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб» та розділи 1-10 монографії «Процессы переработки кофейного шлама»*
- 2) *розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку (10, 18, 21, 22, 31-33, 37-39, 46, 59, 67, 76-78)*
- 3) *проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку (6, 11, 19, 26, 84-85)*
- 4) *проведено літературний пошук, сформульована наукова гіпотеза, підготована стаття до друку (16, 23, 48, 75, 80, 81, 83, 86, 88)*

- 5) розроблено алгоритм розрахунку та оптимізації, проаналізовані результати комп'ютерного експерименту (35, 45, 58, 74)
- 6) сформульовано наукове протиріччя, поставлені завдання для моделювання процесів, підготована стаття до друку (27-28, 41-42, 57, 61-66, 68, 69, 71, 72, 82)
- 7) обґрунтована програма стендових випробувань, проаналізовані результати, підготована стаття до друку (12, 43, 47, 73)
- 8) сформульована наукова проблема, поставлено завдання досліджень, підготована стаття до друку (7-9, 13, 15, 20, 24, 30, 40)
- 9) в співавторстві розроблено математичну модель, підготована стаття до друку (13, 25)
- 10) запропоновано використати методи енергетичного менеджменту для системного аналізу тепло технологій, проаналізовано результати аудиту, підготована стаття до друку (14, 17, 29, 34, 36, 44, 60, 70, 79, 87)
- 11) проведено літературний пошук, запатентована в співавторстві формула винаходу, оформлено матеріали та патент (51-59, 61-66, 89-90)

## АНОТАЦІЯ

**Терзієв С.Г. Інноваційні теплотехнології харчоконцентратних виробництв на основі системного моделювання і комбінованих процесів тепломасопереносу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська національна академія харчових технологій, Міністерство освіти і науки України, Одеса, 2016

У дисертаційній роботі поставлена і вирішується задача підвищення енергоефективності при виробництві харчових концентратів, зниження втрат сировини і готового продукту, створення інноваційних зразків техніки в технологіях кавопродуктів і методів їх розрахунку.

Методами енергетичного менеджменту проведені системні дослідження і встановлені енергоємні об'єкти. Рішення задач в роботі проводилося за загальною схемою: «фізична і математична модель - експеримент - узагальнення та інженерна методика - створення експериментального зразка». Математичне моделювання ґрунтувалося на феноменологічному підході. Експериментальне моделювання проводилося із залученням методів теорії подібності.

Проблема утилізації теплоти і пилових викидів розпилювальної сушарки вирішена за допомогою двофазних термосифонів. Фізична і математична моделі обґрунтували концепцію інноваційного апарату – тепломасоутілізатора (ТМУ). Створена теорія тепломасопереносу паропилогазового потоку в трубних пучках. Доведено можливість роботи ТМУ в режимі «самоочищення» поверхні теплопередачі. Розроблено програму оптимізації ТМУ, виконаний комп'ютерний експеримент і обґрунтований типорозмірний ряд ТМУ для різних технологій АПК.

Проблема скорочення втрат екстрактивних речовин зі шламом вирішена за допомогою мікрохвильових (МВ) інтенсифікаторів. Виготовлений і пройшов апробацію в умовах виробництва експериментальний зразок МВ екстрактора. Розроблено їх типорозмірний ряд.

Проблема вилучення зі шламу олії кави вирішена за допомогою МВ екстрактора олії періодичної дії. Емпіричні моделі отримані на основі методу «аналізу роз-

мірностей». Підготовка шламу до екстрагуванню проводилася на стрічкової ІЧ сушарці. Рекомендовані режими експлуатації сушарки та екстрактора олії кави.

Проблема переробки залишкової твердої фракції шламу вирішена в двох напрямках: теоретично обґрунтовані етапи активації шламу і представлені дослідження гранулювання шламу в паливні пелети.

Доведено економічну ефективність використання розроблених інноваційних зразків техніки і технологій на харчоконцентратних підприємствах галузі.

**Ключові слова:** харчові концентрати, кавапродукти, теплотехнології, термосифонни, моделювання, утилізація, сушіння, екстрагування, кавава олія, енергетичний і екологічний аудит.

## АННОТАЦІЯ

**Терзиев С.Г. Инновационные теплотехнологии пищекокцентратных производств на основе системного моделирования и комбинированных процессов тепломассопереноса. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Министерство образования и науки Украины, Одесса, 2016.

В диссертационной работе поставлена и решается задача повышения энергоэффективности при производстве пищевых концентратов, снижения потерь сырья и готового продукта, создание инновационных образцов техники в технологиях кофе-продуктов и методов расчета предложенных разработок.

На первом этапе методами энергетического менеджмента проведены системные исследования и установлены объекты с неэффективным использованием энергетических ресурсов. Технологический и экологический аудит определили, что потери готового продукта с отработавшим теплоносителем распылительной сушилки составляют 4,5 т в год. Отходы из экстракционных батарей (кофейный шлам) создают серьезные экологические проблемы. Со шламом теряется до 15 % экстрактивных компонентов, комплекс веществ, которые имеют коммерческую ценность. Технологии переработки кофейного шлама в Украине не освоены.

Решение проблемных задач в работе проводилось по общей схеме: «физическая схема – математическая модель – комплексные экспериментальные исследования – обобщение – инженерная методика – создание экспериментального образца». Математическое моделирование основывалось на феноменологическом подходе. Экспериментальное моделирование проводилось с привлечением методов теории подобия. Экспериментальные стенды основывались на оригинальных технических решениях, подключались к компьютеру, который регистрировал и обрабатывал теплофизическую информацию.

Проблема утилизации теплоты и пылевых выбросов распылительной сушилки решена с помощью высокоэффективных теплопередающих элементов – двухфазных термосифонов (ТС). Физическая и математическая модели раскрыли комбинированные процессы в аппарате с ТС, и обосновали концепцию инновационного аппарата – тепломассоутилизатора (ТМУ). Модель формирования слоя пыли в межреберном пространстве ТС основана на гипотезе предельного равновесия массопереноса. Модель взаимодействия пыли и конденсата состоит из трех этапов: консолидации (ад-

гезионные силы между пылью и ТС растут), релаксации (эти силы уменьшаются) и текучести (возникают условия для стекания раствора с ТС). Получены эмпирические модели, которые доказывают выдвинутые гипотезы и создана теория тепломассо-сопереноса паропылегазового потока в трубных пучках. Доказана возможность работы ТМУ в режиме «самоочищения» поверхности теплопередачи. Разработана методика и программа оптимизации ТМУ, выполнен компьютерный эксперимент, установлено влияние конструктивных и режимных параметров и обоснован типоразмерный ряд ТМУ для разных технологий АПК.

Проблема сокращения потерь экстрактивных веществ со шламом решена с помощью микроволновых (МВ) интенсификаторов, которые в капиллярах шлама инициируют мощный гидродинамический поток. Этот поток назван «бародиффузией». Теоретические и экспериментальные исследования обосновали инженерную методику оптимизации МВ экстракторов. Комплексные экспериментальные исследования установили влияния режимных и конструктивных параметров на кинетику извлечения целевых компонентов и на энергетiku процесса экстрагирования. Разработан их типоразмерный ряд. Изготовлен и прошел апробацию в условиях производства экспериментальный образец МВ экстрактора.

Проблема извлечения из шлама масла кофе решена с помощью МВ экстрактора масла периодического действия. Эмпирические модели получены на основе метода «анализа размерностей». Подготовка шлама к экстрагированию проводилась на ленточной ИК сушилке. Показано, что ИК генераторы являются эффективными средствами теплопередачи как основные, так и дополнительные регистры. Рекомендованы режимы эксплуатации сушилки и экстрактора масла кофе.

Проблема переработки оставшейся твердой фракции шлама решена в двух направлениях. Во-первых, теоретически обоснованы этапы активации шлама и разрыва клеточной структуры. Во-вторых, представлены исследования гранулирования шлама в топливные пеллеты и их характеристик.

Новые результаты, полученные в виде критериальных моделей, использованы как базовые при создании алгоритмов и компьютерных программ расчета и оптимизации разработанных образцов инновационной техники.

Итогом работы являются: теория тепломассопереноса паропылегазовых потоков в пучках термосифонов, развитие теории экстрагирования из растительного сырья в микроволновом поле, теоретические основы баротермической деструкции сырья в условиях микроволнового поля. Созданы, прошли стендовые и производственные испытания образцы инновационной техники: тепломассоутилизатор на термосифонах, микроволновой экстрактор кофе, ленточная сушилка с инфракрасными и микроволновыми источниками энергии, микроволновой экстрактор масла и линия по переработки кофейного шлама. Полученные на разработанном оборудовании образцы инновационной неэнергоёмкой продукции: экстракты кофе, жидкий концентрат кофе, масло кофе (рафинированное и кофеоль) получили высокую оценку у дегустаторов.

Доказана экономическая эффективность использования разработанных инновационных образцов техники и технологий на пищевых концентратных предприятиях отрасли. На 1 кг переработанных зерен кофе внедрение тепломассоутилизатора дает прибыль 1,45 грн., микроволновой предэкстрактор – 5,3 грн., производство топлив-

ных пеллет из шлама кофе – 1,5 грн. Наибольший эффект дает экстрактор масла кофе из шлама - 60 грн. Суммарный эффект на 1кг зерен (в зависимости от количества реализованных проектов) от 1,5 до 71 грн. Срок окупаемости проектов в пределах года. По пищевоконцентратной отрасли Украины эффект за год составляет от 2,3 млн.грн. до 112,2 млн. грн.

**Ключевые слова:** пищевые концентраты, кофепродукты, теплотехнологии, термосифоны, моделирование, утилизация, сушка, экстрагирование, кофейное масло, энергетический и экологический аудит.

## ABSTRACT

**Terziev S.G. Innovative heat-technologies of food concentrate productions on system modeling and combine heat-mass transfer processes base. - Manuscript.**

Thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.18.12 – Processes and Equipments of Food, Microbiological and Pharmaceutical Productions. – Odessa national academy of food technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2016.

In dissertation formulated and solved problems of increasing energy efficiency food concentrates production, primary and prepared food products reduction loss, innovative equipment samples for coffee products technologies designing. On the first step using methods of energy management are carried out system researching and set objects with ineffective energy recourses consumption. Technological and ecological monitoring are showed that loss of finished product with spent heat transfer agent of spray dryer is 4,5 tones per year. Wastes from extraction batteries (coffee sludge) make serious problems. There are 15 % of extracting compounds loosing with coffee sludge – complex of valuable substances. Processes of coffee sludge recycling are not mastered.

Problem tasks solution was carried out by standard scheme: “physical scheme – mathematical model – experimental researching complex – generalization – engineering technique – experimental sample creation”. Mathematical modeling is based on phenomenological approaches. Experimental modeling was carried out with using theory of similarity.

Problem of heat and dust ejections of spray dryer recycling are solved by high effective heat transfer elements – biphasic thermo siphons (TS). Physical and mathematical models are disclose combine processes in TS apparatus and grounded conception of innovative apparatus heat-mass utilizer (HMU). Model of forming dust layer in interrib space are based on hypothesis of ultimate heat-mass transfer balance. Model of dust and condensate interaction includes three steps: consolidation (adhesive forces between dust and TS increases), relaxation (that forces are degrease) and flowability (occurs conditions for solution runoff TS)

Empirical models, which one prove advanced hypothesis, was obtained and theory of heat-mass transfer steam-dust-gas flow in tube bundle are created. The possibility of HMU functioning in mode “self-cleaning” heat transfer surface is proved. The methodology and program of optimization HMU is designed, computer experiments are conducted, it