

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БЕЗБАХ ІГОР ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 664.87.036.021.3.4

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ СУШАРОК
ТА ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ АГРЕГАТИВ ДЛЯ ОБРОБКИ В'ЯЗКИХ І
ДИСПЕРСНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних
виробництв

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса 2018

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор

Бурдо Олег Григорович

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

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор

Снєжкін Юрій Федорович

Інститут технічної теплофізики,
НАН України,

директор Інституту технічної теплофізики;

– доктор технічних наук, професор

Потапов Володимир Олексійович

Харківський державний університет харчування та торгівлі,
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри холодильної та торговельної техніки і
прикладної механіки;

– доктор технічних наук, професор

Атаманюк Володимир Михайлович

Національний університет «Львівська політехніка»,
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри хімічної інженерії.

Захист відбудеться **12 грудня 2018 року об 11⁰⁰** на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 41.088.01. Одеської національної академії харчових технологій за адресою:
65039 м. Одеса, вул. Канатна, 112, ауд. А-234.

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

Автореферат розіслано **9 листопада 2018 року**

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



Т. І. Нікітчина

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В роботі обґрунтовано принципи і методи, що формують наукові основи роботи інноваційних енергоефективних апаратів для сушіння дисперсних продуктів, термообробки, випарювання неньютонівських рідин (ННР), що використовують теплові труби (ТТ), термосифони (ТС), ротаційні термосифони (РТС).

Традиційні технології ключових операцій виробництва харчових продуктів – випарювання, термообробка і сушіння відрізняються високою енергоємністю. Україна має великий потенціал виробництва харчових продуктів, але конкурувати на світових ринках можливо, тільки за умови зниження енерговитрат і підвищенні якості продукції. У зв'язку із складною ситуацією в країні виникає необхідність у постачанні військових якісними продуктами харчування, що мають тривалий термін зберігання, легко транспортуються та інше. Цього можливо досягнути за рахунок виробництва різноманітних сушених продуктів та харчових концентратів.

В Україні при виробництві концентратів щорічно випарюється 1,0...1,5 млн. т. води, що в грошовому еквіваленті становить 300...400 млн. грн. Витрата енергії на випарювання становить від $2,8 \cdot 10^6$ кДж на 1 т випаруваної води (одноступінчастий процес) до $0,85 \cdot 10^5$ кДж на 1 т (багатоступінчастий регенеративний процес). В процесі випарювання в більшості випадків утворюються рідини неньютонівської групи. Специфічне поведіння ННР при впливі напруження зсуву, а також високі енерговитрати при їхній обробці, викликають необхідність пошуку нових ефективних способів та обладнання. Поставлена проблема вирішується за рахунок використання нового класу обладнання – термомеханічних агрегатів (ТМА) на базі РТС.

На вітчизняному ринку імпорт сушених продуктів займає 95 %, вітчизняні заводи-виробники практично відсутні. На харчових виробництвах найпоширеніше конвективне сушіння гарячим повітрям або димовими газами. Аналіз стану зерносушильної техніки показує, що в 48% випадків експлуатуються шахтні агрегати вітчизняного виробництва, 38% шахтних сушарок закордонного виробництва, 10% підприємств одночасно використовують вітчизняні й закордонні сушарки, близько 4% аграріїв використовують інші типи сушильного устаткування. Якщо рахувати корисною енергією, що витрачається на випаровування вологи, то ККД конвективних сушарок складає всього 40%. Енерговитрати конвективних сушарок, які використовуються на підприємствах досягають 8 МДж /кг видаленої вологи, що практично втричі більше фізично необхідного мінімуму. Крім того, вміст забруднень у сушильному агенті (і відповідно у продукті) таких сушарок не контролюється. Поставлена проблема вирішується за рахунок використання нового класу обладнання – рекуперативних сушарок на базі ТС, сушарок на базі РТС.

Розглянуто досягнення у відомих наукових школах України: Інститут технічної теплофізики НАН України (Снежкін Ю. Ф.), Донецький національний університет економіки та торгівлі (Поперечний А. М.), Харківський державний університет харчування та торгівлі (Потапов В. О.), Національний університет «Львівська політехніка» (Атаманюк В. М.). Розширення асортименту продуктів, розвиток наукових основ, розроблення сучасних енергоефективних технологій є актуальним для вітчизняної науки і має велике значення для харчової промисловості України.

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

Дослідження, що подаються, виконувалися у межах держбюджетної тематики науково-дослідних робіт 5/09 – П «Новітні енергетично ефективні харчові технології й нанотехнології в АПК» (№ держ. реєстрації 0109U000400) 2009-2011 р., 8/13-П «Нові конструкції сушарок для виробництва екологічно безпечних зернопродуктів при зменшенні питомих витрат енергії» (№ держ. реєстрації 0113U000139) 2013-2014 р., 8/15-П «Теорія і техніка сушіння термолабільної сировини при використанні інноваційних енергоефективних систем термотрансформації та адресної доставки енергії» (№ держ. реєстрації 0115U000295) 2015-2017 р., розробки за держзамовленням «Розроблення енергоефективної зерносушарки на базі термосифонів», договір № ДЗ/13-2017.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення інноваційного енергоефективного обладнання для обробки в'язких і дисперсних продуктів, розробка методів розрахунку й оптимізації такого обладнання.

Для здійснення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- виконати енергетичний аудит ключових операцій виробництва харчових продуктів – випарювання, термообробки, сушіння, дати аналіз потоків енергії, скласти структурні схеми конверсії енергії, обґрунтувати необхідність розробки інноваційного обладнання;

- розробити фізичну схему і математичну модель:

- для внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу в системі конденсатор РТС-продукт при випарюванні харчових ННР;

- в системі конденсатор рекуперативної сушарки-дисперсний продукт;

- для внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу в системі конденсатор РТС- дисперсний продукт;

- обґрунтувати методики, створити експериментальні стенди для комплексних досліджень, провести експериментальні дослідження та визначити вплив режимних параметрів на кінетику процесу:

- сушіння дисперсних продуктів в рекуперативній сушарці;

- випарювання неньютонівських рідин в ТМА на базі РТС;

- сушіння дисперсних продуктів в ТМА на базі РТС;

- розробити інженерну методику розрахунку, провести обчислювальний експеримент і оптимізацію розроблених конструкцій;

- провести виробничі випробування розроблених конструкції інноваційного обладнання, дати економічну оцінку ефективності його експлуатації.

Об'єкт досліджень – процеси сушіння, термообробки, випарювання, неньютонівські харчові рідини, дисперсні продукти, теплотехнології харчових виробництв.

Предмет досліджень – нові конструкції сушарок, термомеханічні агрегати на базі термосифонів та ротаційних термосифонів.

Методи досліджень – теорія подібності, методи теплофізичного моделювання, експериментальні дослідження з використанням контрольно-виміральної 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 та аналітичні методи.

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

1. Вплив на в'язкий продукт за допомогою двофазного випарниково-конденсаційного модуля, що працює в режимі РТС, сприяє ефективному руйнуванню гідродинамічного і теплового приграничних шарів, що призводить до збільшення інтенсивності процесів переносу.

2. Рекуперативний спосіб підводу енергії при сушінні дисперсних продуктів що базується на застосуванні замкнутого випарниково-конденсаційного контуру, узгодження специфіки структури шару матеріалу, що рухається в міжтрубному пучку з компоновочними параметрами пучка сприяє активному перемішуванню шару, рівномірному прогріву зернового об'єму й інтенсифікує тепломасоперенос.

3. Рекуперативний спосіб підводу енергії при сушінні дисперсних продуктів, що базується на застосуванні замкнутого випарниково - конденсаційного контуру, сприяє збільшенню тепломісткості відпрацьованого вологоносія, що дозволяє використовувати його для попереднього нагрівання матеріалу.

В результаті комплексу аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень вперше:

- розроблено конструкції, визначено вплив конструктивних та режимних параметрів на кінетику процесу в інноваційних апаратах: сушарці на базі РТС; випарному апараті на базі РТС; рекуперативній зерносушарці на базі ТС;

- досліджено кінетику процесу сушіння пшениці в рекуперативній зерносушарці: визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора ТС до зернового потоку; отримано термограми зернового потоку; криві сушіння;

- досліджено кінетику процесу сушіння дисперсних продуктів у сушарці на базі РТС: визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора РТС до продукту; отримано термограми при сушінні; криві сушіння; залежність питомих енерговитрат на сушіння від температури поверхні конденсатора у сушарці на базі РТС;

- досліджено кінетику росту концентрації сухих речовин в продукті при випарюванні харчових ННР; отримано термограми при випарюванні томатної маси, яблучного пюре, визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора РТС при випарюванні харчових ННР;

- у роботі розширено уявлення і методом «аналізу розмірностей» отримані структури рівнянь в узагальнених змінних для розрахунку: процесу теплопереносу при випарюванні харчових ННР; ступені змішування зернового шару, коефіцієнтів масовіддачі, тривалості процесу сушіння пшениці, питомих енерговитрат на сушіння в рекуперативній зерносушарці; коефіцієнтів масовіддачі в сушарці на базі РТС;

- обґрунтовано наукові основи, розроблено інженерну методіку, комп'ютерну програму для розрахунку, проведено комп'ютерне моделювання й оптимізація: випарного апарата на базі РТС; рекуперативної сушарки на базі ТС; сушарки на базі РТС;

- розроблено функціональну схему сушарки на базі ТС, конструкторську документацію (креслення) на виготовлення окремих вузлів зерносушарки: шарового підігрівника, сушильної камери, термосифонного калорифера.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано новий клас апаратів, в яких використання РТС, ТС вирішує задачу суттєвого спрощення конструкції, підвищення надійності, суміщення декількох технологічних операцій в одному апараті. Запропоновані конструкції апаратів з РТС спроможні забезпечити ефективний теплоперенос при обробці в'язких та дисперсних харчових продуктів при одночасному зменшенні енергетичних втрат до 30 %.

Розроблена конструкція зерносушарки на базі термосифонів здатна в комплексі вирішувати проблеми екології, ресурсо- і енергоефективності. Конструкція апарату, що складається з окремих вискоелективних модулів – термосифонів, відрізняється простотою монтажу і експлуатації. Гостра потреба в енергоефективних зерносушарках існує в господарствах з сезонною продуктивністю від 0,5 до 25 тис. тон зерна і вище. Створений дослідний зразок зерносушарки на базі термосифонів продуктивністю 6 т/год може вирішувати проблеми обробки: малих партій насіння; селекційного насіння; зерна безпосередньо у виробника. Результати розробки можливо масштабувати на виробництво будь-якої потужності. Термін окупності в межах 3 сезонів роботи сушарки. Комп'ютерні програми можливо використовувати для проектування випарних апаратів, сушарок нового типу. Розроблено проект нормативної документації на випарний апарат із РТС. Промислова апробація випарного апарата із РТС проведена на відкритому акціонерному товаристві «Концерн Хлібпром» в лініях з термообробки в'язких та дисперсних середовищ. Розроблено проект науково-технічної документації на сушарку на базі РТС. Промислову апробацію сушарки на базі РТС проведено на підприємстві ПАТ «Enni Foods». Крім того розроблені конструкції апаратів можна використовувати в хімічній, фармацевтичній промисловості.

Особистий внесок здобувача. Спільно з науковим консультантом (проф. Бурдо О.Г.) формулював наукові положення і концепції наукових досліджень. Автор безпосередньо здійснював наукове керівництво аспірантом Воскресенською О. В. в напрямку комбінованого сушіння дисперсних продуктів в апаратах з РТС, комбінованих сушарках із застосуванням НВЧ поля. 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. Данкоглов В. І., Омар Саїд Ахмед. Надалі представляв з ними спільні доповіді на міжнародних конференціях. Самостійно узагальнив результати цих робіт і запропонував основи теорії тепломасопереносу в розроблених апаратах. Представляв наукові доповіді і готував публікації. Брав участь в проектуванні нових зразків техніки. Займався впровадженням інноваційних зразків техніки в харчовій галузі України.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на обговорювалися на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і науковців Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) в 2004...2018 рр. : на Міжнародних наукових конференціях Енергоефективність –

2004, "Проблемы промышленной теплотехники" 2005р, Хлібопродукти – 2005, Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2008, Повышение энергет. эффективности пищевых и хим. пр-в. (Одеса 2007)., Совершенствование процессов и оборудования пищевых и химических производств (Одеса 2008), Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011, Second International Conference "Heat Pipes for Space Application" (2HPSA), Heat pipes, heat pumps, refrigerators, and power sources. the IX Minsk International Seminar Minsk, Belarus 2015, Минский международный форум по тепло- и массообмену, ИТМО, Минск 2016, Международная научно-техническая конференция, посвящённая 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского (МНТК Плановский - 2016) «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности».

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 37 наукових робіт, в тому числі у 1-й монографія, 5 статей у закордонних виданнях та у фахових українських виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах, 17 статей у фахових виданнях України, 2 статті в інших виданнях, 5 патентів на корисну модель, 7 матеріалів конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з 9 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертаційну роботу викладено на 299 сторінках основного тексту, вона містить 61 таблицю (31 стор.), 166 рисунків (69 стор.) та 6 додатків (другий том роботи).

Список джерел налічує 352 найменування, у тому числі 89 іноземних.

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 і проблеми термообробки й сушіння харчових продуктів» наведена загальна характеристика технологій сушіння, термообробки, концентрування, проведено аналіз ефективності використання сировинних та енергетичних ресурсів. Проведено аналіз наукових основ тепло- масопереносу при сушінні, термообробці, концентруванні, які ґрунтуються на фундаментальних роботах Ликова О. В., Гінзбурга О. С. та інших.

Показано перспективи інтенсифікації процесу сушіння в апаратах на основі ТТ, ТС. Обґрунтовано що застосування ТТ, ТС, РТС дозволить отримати наступні переваги: скорочення ланцюга трансформації енергії; сполучення в апараті декількох технологічних процесів; інтенсифікація тепло- масообміну; адресна доставка енергії до продукту; збільшення надійності конструкції апарата; рекуперація теплоти. Проаналізовано стан техніки для випарювання харчових рідин, виявлені переваги й недоліки традиційних випарних апаратів. Розроблено класифікацію термомеханічних агрегатів. Представлена класифікація містить типові для термомеханічного встаткування ознаки (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація термомеханічних агрегатів.

Розглянуто шляхи інтенсифікації процесів теплопереносу у випарних апаратах. На основі аналізу застосування змішувачів, визначена форма пристрою, що перемішує (шнек), як найбільш придатна для перемішування рідин високої в'язкості (до 100 Па·с), неньютонівських рідин і паст. Наведена класифікація, області застосування шнекових машин, конструктивний розвиток шнекових змішувачів, шнекові випарники. У якості нових технічних рішень пропонується для випарювання харчових ННР застосовувати апарати на базі теплових труб і ротаційних термосифонів. Виконано енергетичний аудит ключових операцій виробництва харчових продуктів – випарювання, термообробки, сушіння. Приведено структурні схеми конверсії енергії.



Рис. 2. Класифікація апаратів для сушіння й теплової обробки дисперсних харчових продуктів.

Проаналізовано стан техніки для сушіння зерна, енерговитрати і якість зерна при сушінні. Розглянуто принципи підвищення енергетичної ефективності технологій сушіння, переваги й недоліки існуючих конструкцій конвективних сушарок. Приведено схеми рекуперативних зерносушарок. Розроблено класифікацію апаратів для сушіння й теплової обробки дисперсних харчових продуктів (рис. 2).

У другому розділі «Характеристика об'єктів, методології й методики досліджень» наведено схеми експериментальних установок, методики досліджень, діапазон експериментальних досліджень. Сформовано програму досліджень (рис. 3).



Рис. 3. Програма досліджень.

Об'єктами досліджень є як весь технологічний ланцюжок виробництва й енергоємне встаткування, так і продукти які обробляються. Розглянуто характеристики ННР, дисперсних продуктів як об'єктів дослідження. Наведено класифікацію оброблюваних продуктів як об'єктів досліджень (рис. 4). Для дисперсних зернових продуктів наведені граничні температури нагрівання, граничні вологості та ін. технологічні параметри, які необхідно знати й дотримуватись при сушінні для того щоб

не зіпсувати продукт і його якість. Для ННР наведено значення в'язкості й вплив швидкості й напруження зсуву на цю величину.



Рис. 4. Об'єкти досліджень.

Наведено конструкції експериментальних стендів. Для дослідження процесів тепло- масообміну в ТМА на базі РТС розроблено експериментальну установку (рис. 5).

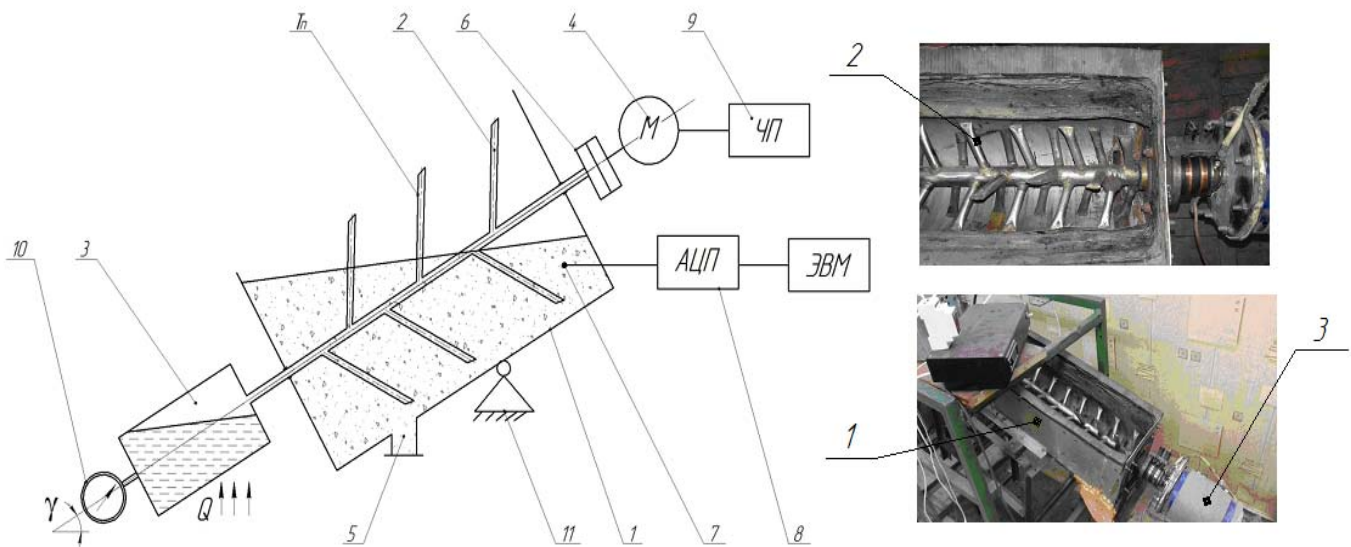


Рис. 5. Конструкція експериментальної установки ТМА на базі РТС: 1 – корпус, 2 – ротaційний термосифон, 3 – випарник, 4 – електродвигун, 5 – патрубок, 6 – муфта, 7 – термопара, 8 – аналого-цифровий перетворювач, 9 – частотний перетворювач, 10 – манометр, 11 – шарнір.

Варіювались режимні параметри: кут нахилу РТС γ ; частота обертів РТС, n ; тиск у конденсаторі РТС, P ; потужність, що підводиться (табл. 1).

Таблиця 1

Діапазон вимірюваних величин

Продукт	Нахил РТС, γ	Частота обертів РТС, n	Тиск в конденсаторі РТС, P	Потужність нагрівача, N	Вологість продуктів початкова, ω_n
	град.	хв^{-1}	МПа	кВт	%
Пшениця	30...45	14...28	0,05...0,15	0,8...1,5	20
Варений горох					25
Амарант					20
Просо					19

Експерименти проводились за періодичною схемою. Початкова вологість продуктів вибиралась згідно технологічним вимогам ω_n , %. Зволоження зерна перед дослідженнями, розрахунки коефіцієнтів тепло- масовіддачі проведено за стандартними методиками.

Дослідження механіки обтікання шаром зерна поверхні термосифонів в рекуперативній сушарці проводилося візуальним методом за допомогою “міченого шару”. Експерименти проводилися на озимій пшениці Одеська 51. Для проведення експериментів використовувалася прямокутна шахта зі стінками з органічного скла. Картини обтікання ТС фотографувалися, проводилася відеозйомка потоку зерна. З картин обтікання визначалися конфігурація й розміри зони впливу ТС. Величини локальних швидкостей міченого шару визначали за допомогою програми Macromedia Flash. Наведено конструкцію експериментального стану для механіки обтікання. Експериментальна установка «Рекуперативна зерносушарка» включала шахту, норію, прийомний і завантажувальний бункери, шибер (рис. 6).

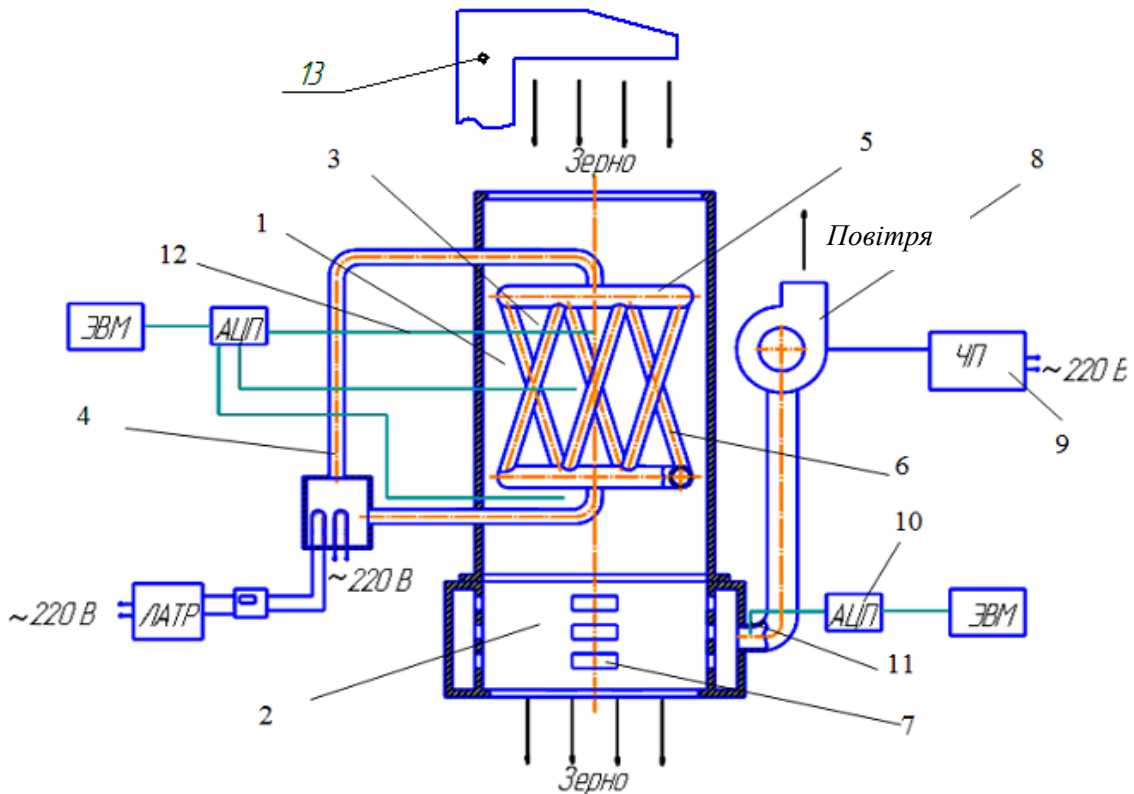


Рис. 6. Експериментальний стан «Рекуперативна сушарка»: 1 – шаровий підігрівник зерна, 2 – сушильна камера, 3 – конденсаційна ділянка термосифона, 4 – випарна ділянка термосифона, 5 – торові камери, 6 – пучок труб, 7 – канали для відводу вологого повітря, 8 – вентилятор, 9 – частотний перетворювач, 10 – аналогово-цифровий перетворювач, 11 – датчик для вимірювання параметрів повітря, 12 – термопара, 13 – норія.

Продуктивність норії регулювалася шляхом зміни поперечного перерізу потоку зерна. Сушарка містить шаровий підігрівник 1, сушильну камеру 2, термосифон, конденсаційна ділянка 3 якого розташований усередині шарового підігрівника 1, а випарна ділянка 4 розташована зовні сушарки. Конденсаційна ділянка 3 термосифону шарового підігрівника 1 виконана у вигляді торових камер 5, з'єднаних пучками труб 6 з нахилом $50...60^\circ$. У корпусі сушильної камери 2 виконані канали 7 для відводу пароповітряної суміші за допомогою вентилятора 8, з'єданого із сушильною

камерою 2. Експерименти по сушінню проведено на пшениці (табл. 2).

Таблиця 2

Діапазон вимірюваних величин

Культура	Швидкість повітря на виході із сушарки	Вологість зерна	Витрата продукту	Температура зернового потоку	Тиск у модулі ТС	Потужність нагрівача, N	Тривалість сушіння
	м/с	%	кг/с	°С	МПа	кВт	хв.
Пшениця	3...20	12...25	0,02...0,4	20...100	0,1...0,4	1...4	0...180

Для дослідження процесу випарювання розробили експериментальну установку (рис. 7).

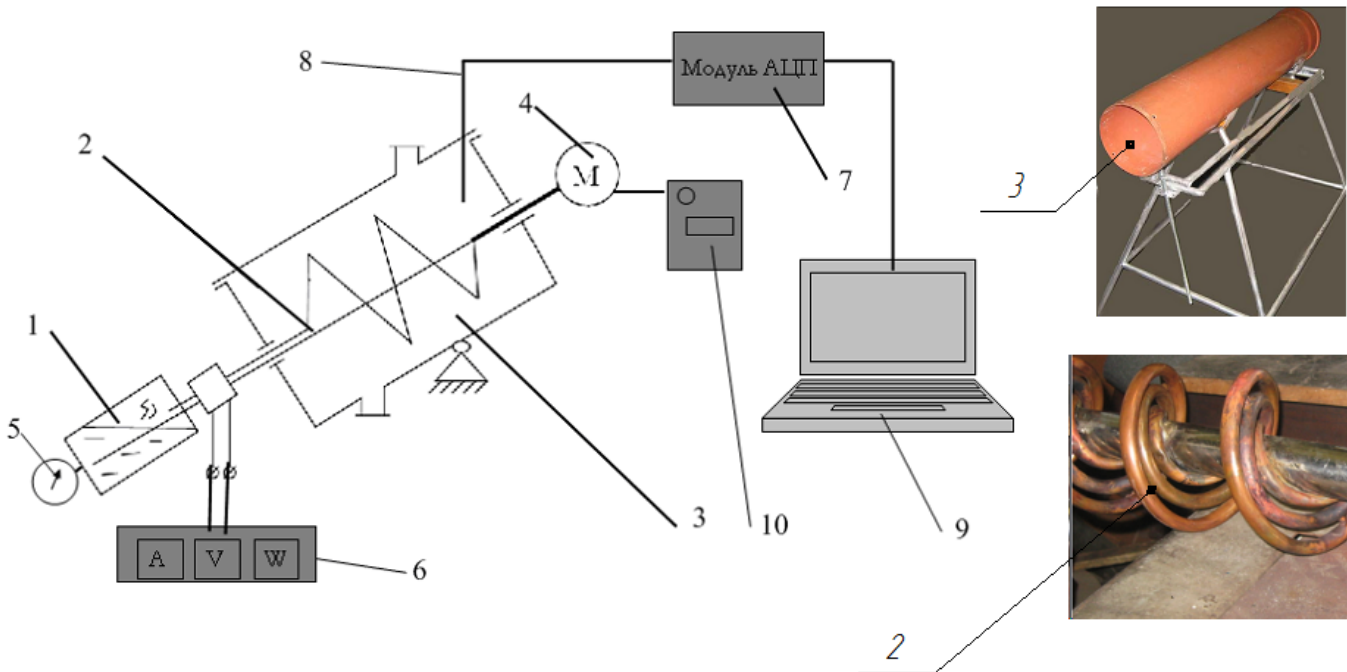


Рис. 7. Схема експериментальної установки: 1 – парогенератор; 2 – конденсатор; 3 – корпус; 4 – двигун; 5 – манометр; 6 – вимірювальний комплекс K-50; 7 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 8 – термопари; 9 – комп'ютер; 10 – частотний перетворювач.

Температуру розчину вимірювали за допомогою мідь-константанових термопар. Вимірювання температури робили в окремих точках об'єму, після чого значення температури усереднювались. Дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП, перетворювалися в цифровий сигнал і вводилися в комп'ютер. Температуру теплоносія визначали за величиною тиску пари в конденсаторі РТС. Інтервал реєстрації даних – 600 с. Температура поверхні РТС при кипінні розчину підтримувалася постійною. Експерименти проведені на томатній масі, яблучному пюре в широкому діапазоні параметрів (табл. 3). У зв'язку з обмеженою кількістю властивостей харчових продуктів залежно від швидкості зсуву, а саме для томатної маси і яблучного пюре в діапазоні експериментальних значень сухих речовин проведено визначення в'язкісних властивостей цих продуктів залежно від швидкості зсуву.

Наведено конструкцію експериментального стенду для визначення в'язкості ННР.

Таблиця 3

Умови експериментальних досліджень

Продукт	Кут нахилу РТС, γ	Частота обертання РТС, n	Тиск у конденсаторі РТС, P	Потужність нагрівача, N
	градус	хв^{-1}	МПа	кВт
Яблучне пюре	30...45	2...28	0,05...0,15	0,8...1,5
Томатна маса				

Наведено методи та методики: дослідження процесів гідродинаміки, тепло-масообміну в термомеханічних агрегатах; визначення сухих речовин у харчових ННЖ; експериментальних досліджень по нагріванню харчових ННЖ; визначення коефіцієнта тепловіддачі при випарюванні харчових ННЖ; визначення ефективної в'язкості оброблюваних продуктів; дослідження тепло-масообміну при сушінні зерна в сушарці із РТС; дослідження процесів гідродинаміки, тепло-масообміну в рекуперативних сушарках; дослідження механіки обтікання; визначення локальних швидкостей потоку; дослідження гранулометричного складу продукту після сушіння. Розглянуто методику узагальнення результатів експериментів, зроблено оцінки погрешностей вимірювань.

У третьому розділі «Моделювання процесів гідродинаміки й тепло-масообміну в термомеханічних агрегатах на базі РТС» розглядається моделювання зовнішньої й внутрішньої задачі для термомеханічних агрегатів. Внутрішня задача враховує моделювання процесів теплообміну усередині конденсатора РТС. Зовнішня пов'язана з моделюванням процесів гідродинаміки, тепло-масообміну в системі РТС-продукт. Проведено аналітичне моделювання внутрішньої задачі в розгалуженому конденсаторі. При великих значеннях частоти обертання РТС інтенсивність внутрішньої теплопередачі визначається в основному термічним опором шару теплоносія. Розподіл конденсату по осі труби визначається рівновагою діючих у шарі сил. Розглянуто баланс сил при роботі РТС із розгалуженим конденсатором. Визначено рівняння для розрахунку числа Фруда, що відповідає кризі теплопередачі.

Якщо не враховувати сили в'язкості й Коріолісові сили, баланс сил, що відповідає кризі теплопередачі визначається:

$$F = F_{\psi} - F_g > 0, \quad (1)$$

де F_{ψ} – відцентрова сила, Н; F_g – сила тяжіння, Н.

Умова (1) відповідає функції критичного числа Фруда Fr_k . Відношення відцентрових сил до проекції сил тяжіння є шуканим числом Фруда:

$$Fr_k = \frac{n^2 D}{g \sin \gamma}, \quad (2)$$

де n – частота обертів РТС, с^{-1} ; γ – кут нахилу РТС, град, D – діаметр РТС.

Таким чином, умова, при якому конденсат буде залишатися в i -й трубці $Fr \geq 1$.

Проведено експериментальне моделювання внутрішньої задачі в шнековому конденсаторі РТС. Застосування шнекового РТС дає ряд переваг – стабільність ро-

боти не залежно від частоти обертів, перемішування, змішування, транспортування. Кут нахилу шнекового РТС буде визначати умови повернення конденсату у випарник. Для моделювання внутрішньої задачі в шнековому РТС проведено ряд експериментів. Використано порожній скляний шнек та ємність із підфарбованою рідиною. Ємність шарнірно закріплена. Шнек приводився в рух двигуном. В експериментах змінювали кут нахилу шнека (γ) і вимірювали витрати рідини, яку піднімав шнек. Визначено кути нахилу, при яких внутрішній теплообмін буде найбільш ефективний ($\gamma=37\dots45^\circ$).

Проведено аналітичне моделювання зовнішньої задачі для системи РТС-ННР. Моделювання теплообміну при випарюванні розділено на дві задачі: 1) моделювання в системі "РТС-продукт" без перемішування; 2) моделювання в системі "РТС-продукт, що рухається". Тепловіддачу при лінійному русі продукту без його перемішування враховували за допомогою залежностей 3–6. Число Нусельта (Nu_1) при лінійному числі Рейнольдса $1 < Re_1 < 10^7$ визначали за формулами:

$$Nu_{лам} = 0,664 \sqrt{Re_1} \sqrt[3]{Pr} \quad (3)$$

$$Nu_{турб} = \frac{0,037 Re_1^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re_1^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

$$Nu_1 = 0,3 + \sqrt{Nu_{лам}^2 + Nu_{турб}^2} \quad (5)$$

За умови $Re_1 < 1$ лінійне число Нусельта розраховувалося за формулою:

$$Nu_1 = 0,75 \sqrt[3]{Re_1 Pr} \quad (6)$$

Сумарне число Нусельта (Nu), дорівнює сумі чисел Нусельта при лінійному русі продукту й при перемішуванні (Nu_n):

$$Nu = Nu_1 + Nu_n \quad (7)$$

При моделюванні в системі "ротаційний термосифон – продукт, що рухається" для одержання структур критеріальних рівнянь використано метод аналізу розмірностей. Коефіцієнт тепловіддачі від РТС до продукту залежить від наступних параметрів: швидкості потоку (ω), в'язкості (μ), теплових властивостей продукту (питомої теплоємності (C_p), теплопровідності (λ)); геометричних параметрів конденсатора–діаметра (d), а також відношення кута нахилу конденсатора γ до базового γ_0 ; частоти обертання конденсатора (n). Одержано:

$$\alpha = f(\omega, d, \mu, \rho, \lambda, C_p, n, \gamma/\gamma_0) \quad (8)$$

При $\omega = \text{var}$, $n=0 \text{ c}^{-1}$, відповідно до π -теореми, зв'язок між цими параметрами встановлено у вигляді 3 безрозмірних комплексів. Умови безрозмірності даного виразу виводили безпосередньо з розмірної матриці. Групуючи окремі величини, одержали критеріальне рівняння виду:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = \left(\frac{\omega d \rho}{\mu} \right)^{k_4} \cdot \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{k_6} \quad (8)$$

При $\omega, n, \gamma = \text{var}$, відповідно до π -теореми зв'язок між параметрами встановлено у вигляді 5 безрозмірних комплексів:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = A \cdot \left(\frac{\omega d \rho}{\mu} \right)^{k_4 - k_7} \cdot \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{k_6} \cdot \left(\frac{\rho d^2 n}{\mu} \right)^{k_7} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{k_8} \quad (9)$$

У рівняннях (8,9): A – константа, k_4, k_6, k_7, k_8 – показники степені, $Nu_n = (\alpha d / \lambda)$ – число Нусельта для конденсатора, що обертається, $Re_1 = (\omega d \rho / \mu)$ – число Рейнольдса, $Pr = (\mu C_p / \lambda)$ – число Прандтля, $Re_m = (n d^2 \rho / \mu)$ – число Рейнольдса модифіковане.

Проведено аналітичне моделювання процесу сушіння дисперсних продуктів в ТМА на базі РТС (рис. 8). Процес розглянуто як квазістаціонарний. Моделювання ускладнюється тим, що має місце дві фази. Перша – повітря, що рухається в міжзерновому просторі, друга – об'єм зерна, усередині сушарки. На ефективний коефіцієнт масовіддачі впливає β : еквівалентний діаметр зернівки $d_{з.з.}$, діаметр трубок конденсатора $d_{тр}$, температура поверхні конденсатора РТС – $T_{п}$, окружна швидкість трубки модуля ω , коефіцієнт дифузії водяної пари в повітря $D_{п}$; коефіцієнт дифузії вологи усередині зернівки $D_{з}$; температура повітря $T_{сух}$; температура мокрого термометра $T_{м}$; парціальний тиск насиченої пари в повітрі p_v ; швидкість повітря в міжзерновому просторі $\omega_{м.п.}$; тиск пари над поверхнею матеріалу $P_{пр}$; площа зерна F_z ; коефіцієнт температуропровідності зернівки – a ; площа поверхні конденсатора РТС – F .

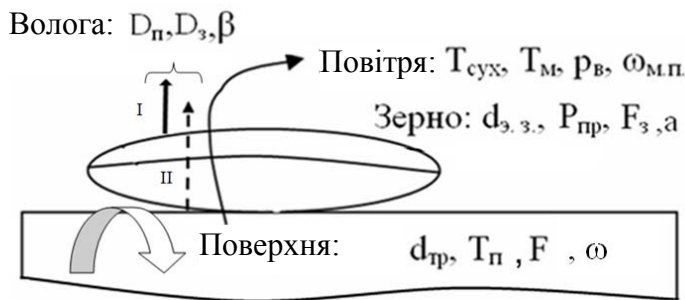


Рис. 8. Схема процесу сушіння зерна в сушарці на базі РТС.

Зернівку омиває потік повітря, яке є вологоносієм. Повітря забирає в себе вологу й охолоджує зерно, на відміну від конвективних сушарок, у яких повітря нагріває зерно. Рушійна сила процесу сушіння в першому періоді – різниця парціальних тисків водяної пари над продуктом і в повітрі ($P_{пр} - p_v$). Таким чином, у першому періоді

сушіння умови, що визначають масовіддачу будуть на границі фаз – режим руху повітря зовні зернівки, площа зернівки, температура поверхні конденсатора РТС. У другому періоді сушіння відбувається перенесення вологи в стиснутих умовах. Визначальний параметр – коефіцієнт дифузії вологи усередині зернівки D_z . Інтенсивність процесу масовіддачі прямо пов'язана з температурою нагрівання зерна. За допомогою метода аналізу розмірностей одержано структуру критеріального рівняння виду:

$$Nu_m = f \left[Pe, \left(\frac{t}{T} \right), \left(\frac{a}{D} \right) \right], \quad (10)$$

де $Nu_m = \frac{\beta \cdot d_k}{D}$ – число Нусельта дифузійне; $Pe_T = \frac{\omega \cdot d}{a}$ – число Пекле теплове;

$\left(\frac{t}{T} \right)$ – симплекс температур; $\left(\frac{a}{D} \right)$ – симплекс, що відповідає за тепло-фізичні властивості матеріалу й повітря.

Згідно π - теореми отримано 4 безрозмірних комплекси. Крім того, процес сушіння розглянуто як нестационарний, у такому випадку кінетичні коефіцієнти можна розраховувати використовуючи структуру рівняння, запропоновану Ликовим О. В.:

$$\frac{u_k}{u_H} = C \cdot Fo_D^{k_1} \cdot Bi_D^{k_2} \quad (11),$$

де $Fo_D = \frac{D_3 \cdot \tau}{d_{3.3}}$ – число Фур'є дифузійне; $Bi_D = \frac{\beta \cdot d_{3.3}}{D_3}$ – число Біо дифузійне; C ,

k_1, k_2 – константи.

У четвертому розділі «Моделювання процесів гідродинаміки й тепло- масообміну в рекуперативних сушарках» розглядається моделювання зовнішньої задачі для рекуперативних сушарок. У рекуперативних сушарках використані статичні поверхні нагрівання (конденсаційні ділянки термосифонів). Розглянуто процеси гідродинаміки, тепло- масообміну в системі конденсатор термосифона – продукт. Конструкція конденсатора термосифона повинна забезпечувати активне перемішування зернового потоку. Тому необхідно провести дослідження процесів руху, перемішування зернового потоку усередині сушарки. Конденсатор термосифона являє собою похилу поверхню. Розглянуто баланс сил, що діють на зернівку. Отримано формулу розрахунку швидкості зернівки, при її русі усередині шахти.

$$v = \sqrt{2gL(\sin \alpha - \mu' \cos \alpha) + v_0}, \quad (12)$$

де g – прискорення вільного падіння; $g=9,81 \text{ м/с}^2$; L – шлях, пройдений зерном до даної точки від початку руху, м; α – кут нахилу трубки, град; μ' – коефіцієнт тертя; v_0 – початкова швидкість зернівки, м/с.

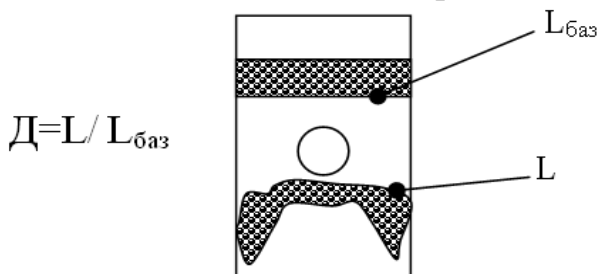


Рис. 9. Визначення ступеня змішування з картин обтікання теплових труб.

Для теплообміну зернового потоку в шахті важливо щоб потік ефективно перемішувався. Визначено функції для розрахунку ступеня змішування зернового шару. Чим вище ступінь змішування при обтіканні теплових труб зерновим потоком, тим вище коефіцієнти тепловіддачі від поверхні труби до зерна. З картин обтікання, отриманих у дослідженнях, одержано ступінь змішування при проходженні міченого шару зерна через зону труби.

Для визначення ступеня змішування міченого шару із загальним об'ємом зернового потоку визначено периметр міченого шару до ($L_{баз}$) і після (L) проходження їм зони труби. Ступінь змішування визначено як співвідношення $L/L_{баз}$ (рис. 9). Ступінь змішування залежить від розмірів, форми труби й кута її нахилу.

Розглянуто моделі тепло- масопереносу для конвективних сушарок. А також моделі для розрахунку тривалості процесу сушіння. Для теплообміну в системі поверхня - зерновий потік відомі моделі Бурдо О. Г., Зикова О. В., Гайда С. Для масообміну моделі відсутні. Також відсутні моделі, що враховують властивості дисперсних продуктів.

Моделювання процесу сушіння в рекуперативній зерносушарці також ускладнюється тим, що задачі масообміну необхідно вирішувати для системи, що складається з потоків повітря-зерно-гріюча поверхня. Проведено аналітичне моделювання процесу сушіння дисперсних продуктів в рекуперативній сушарці. Залежність коефіцієнту масовіддачі β від режимних факторів отримана за допомогою методу аналізу розмірностей.

$$\text{Nu}_D = f \left[\text{Pe}_T, \left(\frac{t}{T} \right), \left(\frac{a}{D} \right) \right], \quad (13)$$

де Nu_D – число Нусельта дифузійне, Pe_T – число Пекле теплове, t/T – симплекс температур; a/D – симплекс тепло- фізичних параметрів.

Аналогічно отримано вид рівняння в числах подібності для розрахунку питомих енерговитрат на процес сушіння:

$$\frac{j}{j_0} = A \cdot \left(\text{Re}_B \right)^k \cdot \left(\frac{T_{\text{сух}}}{T_{\text{п}}} \right)^n, \quad (14)$$

де j – енерговитрати на процес сушіння, МДж/кг; $j_0 = 2,5$ МДж/кг – базові енерговитрати на процес; Re_B – число Рейнольдса для повітря, що рухається в міжзерновому просторі; $T_{\text{сух}}/T_{\text{п}}$ – симплекс температур; A, k, n – константи.

Визначено вид рівняння для розрахунку ступеня змішування:

$$D = B \cdot \text{Fr}^l, \quad (15)$$

де D – ступінь змішування; Fr – число Фруда; B, l – константи.

У п'ятому розділі «Експериментальні дослідження процесів гідродинаміки й тепло- масообміну в рекуперативних сушарках» розглядається експериментальне моделювання процесів тепло- масообміну при сушінні дисперсних продуктів в рекуперативних сушарках. У розділі об'єднані результати по дослідженню механіки обтікання, сушінню дисперсних харчових продуктів у рекуперативних сушарках. Експериментальні дослідження проведено з метою встановити кінетику масопереносу при сушінні харчових дисперсних систем у рекуперативних сушарках.

В експериментах змінювалась швидкість зернового потоку $V_{\text{зп}}$ та розміри ТС. При обтіканні плоскої труби отримані локальні значення швидкості шару зерна та ступінь гальмування (рис. 10, 11), $V_{\text{зп}} = 30$ мм/с.

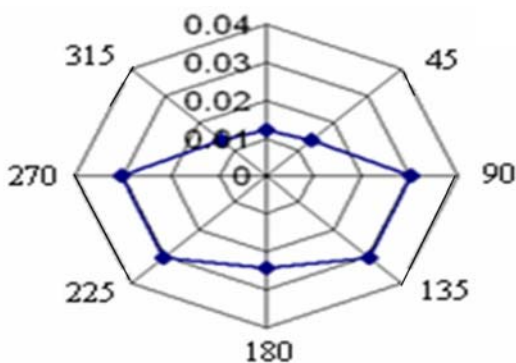


Рис. 10. Локальні значення швидкості шару зерна при обтіканні одиночної плоскої труби пшеницею.

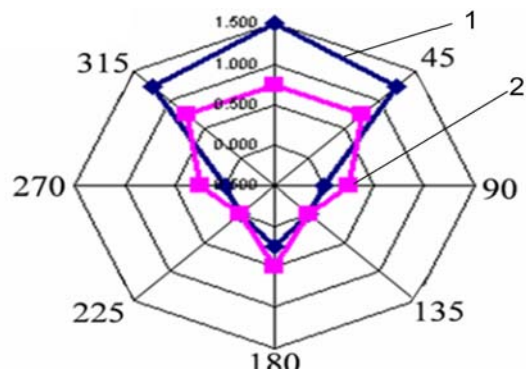


Рис. 11. Ступінь гальмування зернового шару: 1 – пшениця, 2 – кукурудза.

Також отримані поля швидкостей при обтіканні круглого ТС кукурудзою. Характерні картини обтікання шаром зерна труби з нахилом представлені на рис. 12. Швидкість шару $V_{з.п.} = 20$ мм/с, $\varnothing 27$ мм.

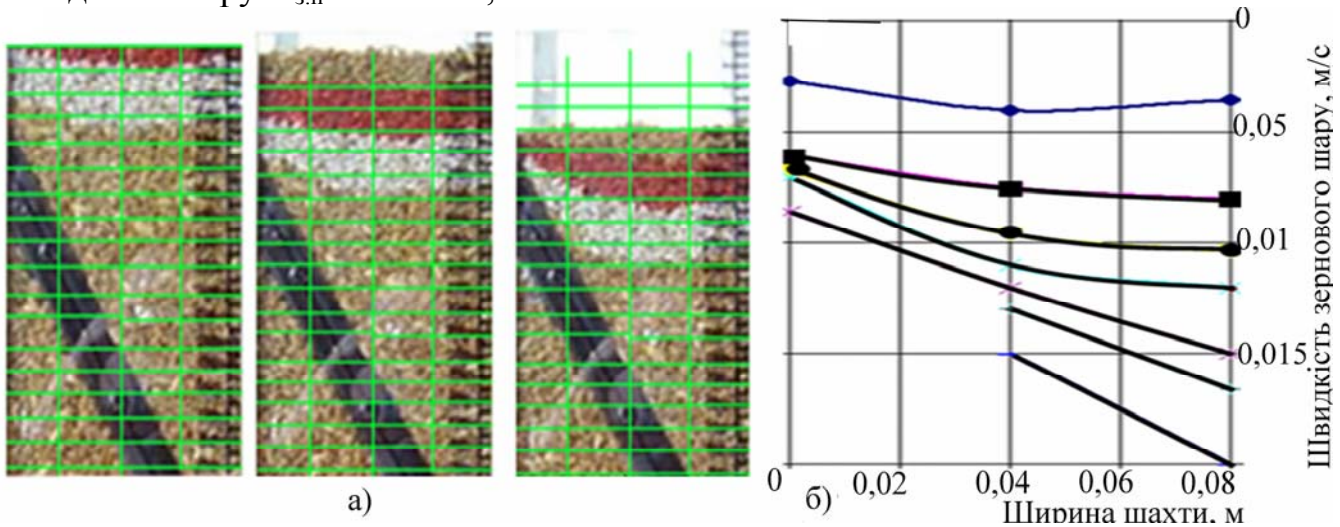


Рис. 12. Обтікання зерновим шаром пшениці труби з нахилом: а) картини обтікання; б) поля швидкостей.

В експериментах по візуалізації (рис. 12 а) використані два мічених шари для того, щоб оцінити ступінь перемішування зернівок. Видно, що в зоні дії труби відбувається інтенсивне перемішування міченого шару. Застійні зони відсутні. Отримано поля швидкостей при обтіканні труби з нахилом (рис. 12 б). У результаті досліджень механіки обтікання й аналізу фізичних властивостей зерна пшениці визначена форма пучка та кут нахилу ТС (60°) що сприяє ефективному перемішуванню шару зерна, усуненню застійних зон і зон відриву потоку, що є передумовою для підвищення теплопередаючих характеристик модуля. З картин обтікання, одержано ступінь змішування при проходженні міченого шару зерна через зону труби (рис. 13 а). Отримано залежність коефіцієнта тепловіддачі від середньої швидкості потоку зерна при температурі поверхні модуля $T_n = 142,9^\circ\text{C}$ (рис. 13 б).

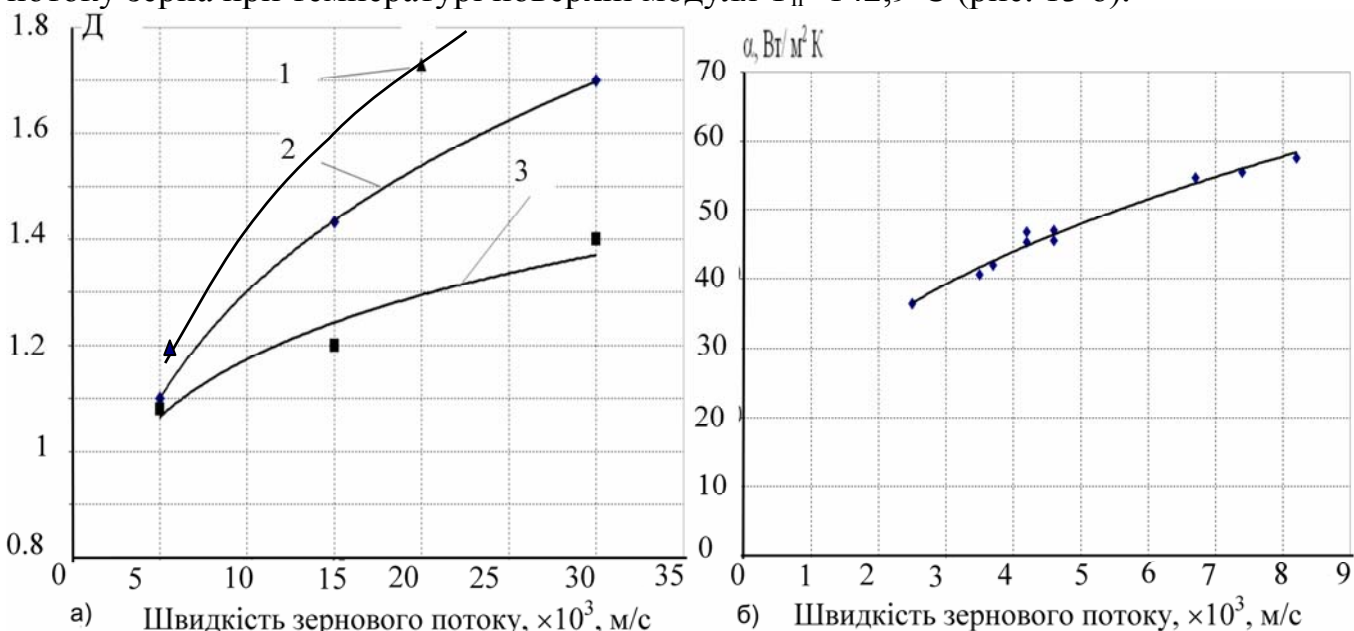


Рис. 13. Вплив швидкості зернового потоку: а) на ступінь змішування для різних труб: 1 – труба з нахилом, 2 – кругла $\varnothing 27$ мм, 3 – плоска, $46,2 \times 5,3$ мм; б) на коефіцієнт тепловіддачі.

Зі збільшенням середньої швидкості потоку зерна росте значення коефіцієнта тепловіддачі. Це пояснюється умовами обтікання потоку поверхні труби. Отримано криві сушіння та термограми при сушінні пшениці в рекуперативній зерносушарці (рис. 14, 15).

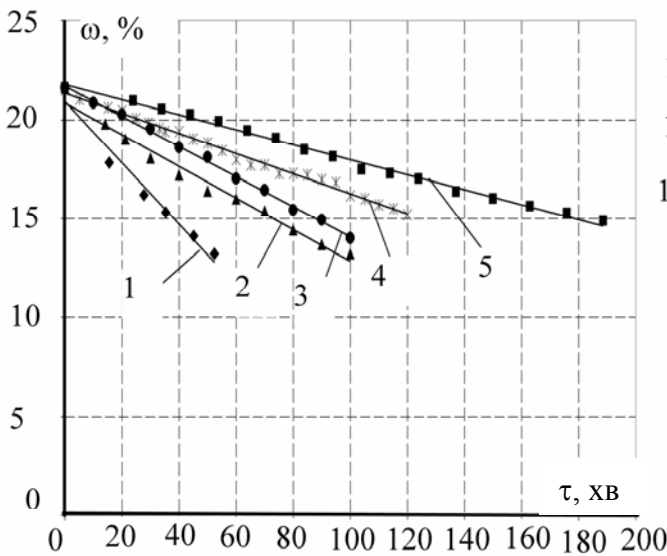


Рис. 14. Криві сушіння $T_{\text{п}}=133,5^{\circ}\text{C}$: 1 - $\omega_{\text{м.п}}=1,6$ м/с, $G_3=0,02$ кг/с; 2 - $\omega_{\text{м.п}}=0,4$ м/с, $G_3=0,2$ кг/с; 3 - $\omega_{\text{м.п}}=0,4$ м/с, $G_3=0,4$ кг/с; 4 - $\omega_{\text{м.п}}=0,4$ м/с, $G_3=0,06$ кг/с; 5 - $\omega_{\text{м.п}}=0,4$ м/с, $G_3=0,02$ кг/с.

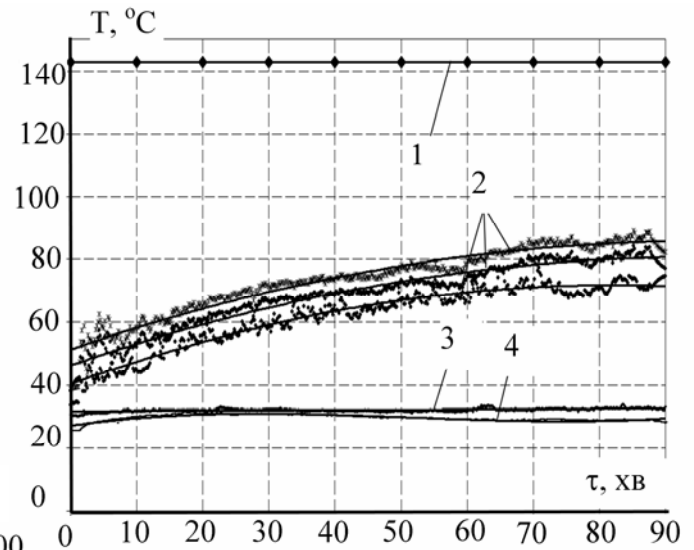


Рис. 15. Термограми $G_3=0,02$ кг/с, $T_{\text{п}}=142,9^{\circ}\text{C}$, $\omega_{\text{м.п}}=0,4$ м/с: 1 - поверхні ТС; 2 - зернового потоку; 3 - повітря, «сухий» термометр; 4 - повітря, «вологий» термометр.

Для вимірювання температури зернового потоку усередині шахти використовували три термопари. Дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП і вводилися в ПК. Температуру повітря, що видаляється із сушарки, визначали за допомогою стандартного психрометра і двох термопар. Вологість зерна вимірювали за допомогою цифрового вологоміра РМ-600. Максимальна швидкість сушіння (0,17 %/хв.) в серії всіх дослідів отримана за умов $T_{\text{п}}=142,9^{\circ}\text{C}$, $\omega_{\text{м.п.}}=1,6$ м/с, витраті зерна $G_3=0,02$ кг/с, вологості зерна 25 %. Проведено дослідження кінетики сушіння в рекуперативній зерносушарці з утилізацією теплоти повітря (рис. 16,17).

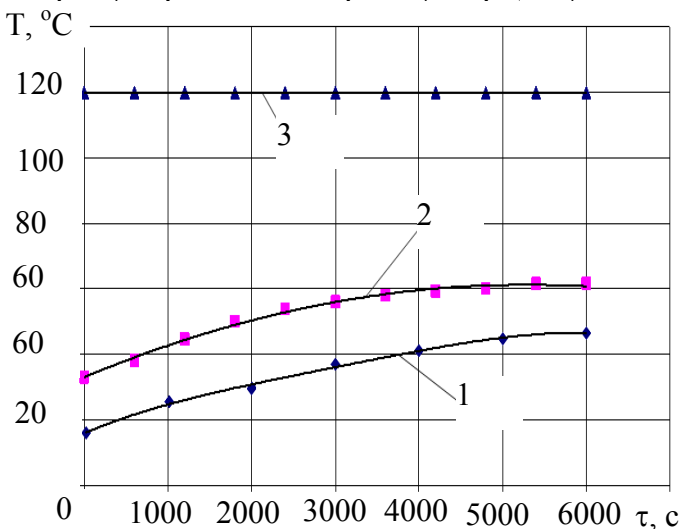


Рис. 16. Термограми: 1 – температура повітря, що видаляється; 2 – температура зернового потоку; 3 – температура поверхні ТС.

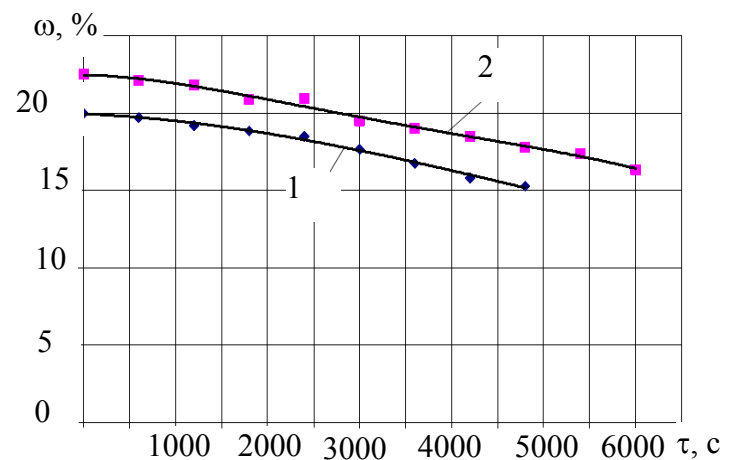


Рис. 17. Криві сушіння зерна пшениці в рекуперативній сушарці з утилізацією теплоти повітря: 1 – при витраті повітря 0,02 кг/с; 2 – при витраті повітря 0,006 кг/с.

Експерименти проведені на стенді «Рекуперативна сушарка», на який було додатково встановлено теплообмінник для конденсації пари вологого повітря. Відбувалася реєстрація параметрів повітря, що видаляється із сушарки, а саме його температури, вологості, вологовмісту, ентальпії (рис. 18,19).

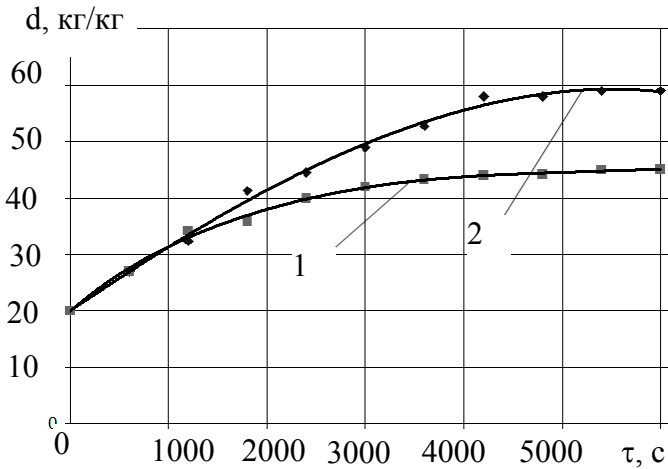


Рис. 18. Зміна вологовмісту повітря, що видаляється: 1 – при витраті повітря 0,02 кг/с; 2 – при витраті повітря 0,006 кг/с.

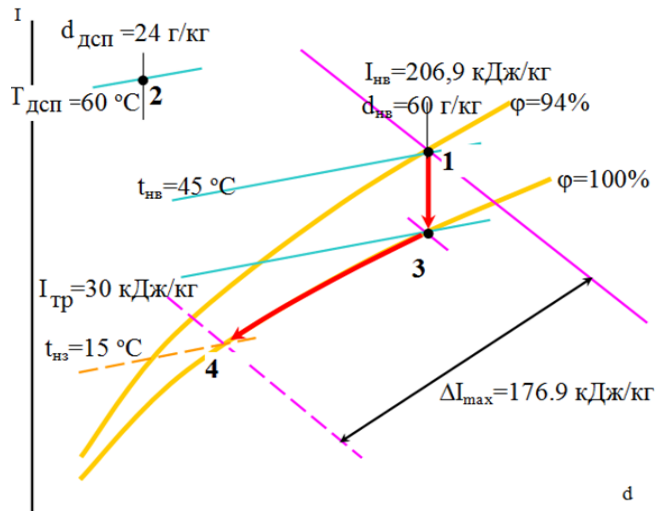


Рис. 19. Процес охолодження повітря в рекуперативній сушарці з утилізацією теплоти повітря, що видаляється.

Вимірювання зазначених параметрів проводилося за допомогою цифрового датчика вологості типу SHT 10, модуля АЦП «Arduino» і ЕОМ. Отримано зміни температури повітря, зернового потоку. Температуру поверхні ТС утримували постійною. Період нагрівання зернового потоку триває близько 3000 с, температура зернового потоку стабілізується й стає рівною 60 °С. Криві сушіння при різних витратах повітря показані на рис. 17. Визначено характеристики повітря безпосередньо в потоці: температура, відносна вологість, ентальпія, вологовміст. Ентальпія повітря на виході із сушарки досягає 200 кДж/кг.

Після аналізу ліній сушіння й розрахунку швидкості сушіння видно, що швидкість сушіння постійно зростає. Параметри відпрацьованого повітря, отримані в експериментах нанесені на І-d діаграму стану вологого повітря (рис. 19). На рис. 19: $I_{нв}$ – ентальпія на виході з рекуперативної сушарки, $d_{нв}$ – вологовміст на виході з рекуперативної сушарки, $t_{нв}$ – температура на виході з рекуперативної сушарки, $T_{дсп}$ – температура на виході із сушарки ДСП - 32, $d_{дсп}$ – вологовміст на виході із сушарки ДСП - 32, $I_{тр}$ – ентальпія повітря в точці роси, ΔI_{max} – максимальна різниця ентальпії. Точка 1 відповідає параметрам повітря, що видаляється з рекуперативної зерносушарки ($I_{нв}$, $d_{нв}$, $t_{нв}$). Для порівняння нанесені параметри повітря, що видаляється із зерносушарки ДСП-32 (Точка 2). Повітря на виході з рекуперативної зерносушарки має більшу вологість, і вологовміст що робить його близьким до точки фазового переходу. Зростає потенціал використання такого повітря як теплоносія для попереднього підігріву зерна. Крім того витрата повітря в сушарці ДСП 32 і рекуперативної відрізняються на порядки. При проведенні експериментів були досягнуті параметри точки 3. Завдання подальших експериментів – у теплообміннику-рекуператорі підігріти зерно до сушіння за рахунок енергії повітря, що видаляється, і наблизиться до параметрів т. 4.

У шостому розділі «Експериментальні дослідження процесів тепло масообміну при сушінні дисперсних продуктів в ТМА на базі РТС» наведені результати досліджень, що проведені на експериментальних стендах кафедри процесів обладнання та енергетичного менеджменту ОНАХТ. При вимірюванні температури, дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП і вводилися в ПК. Отримано температури при сушінні пшениці, амаранту, просо, вареного гороху в установці з РТС (табл. 4).

Таблиця 4

Зміна температури для пшениці при різних температурах поверхні РТС

τ, c \ $T_{п}, ^\circ C$	85	100	115
0	20,3	20,6	24
600	45,1	52,3	54,9
1200	51,4	59,4	65
1800	54,2	65,6	70,3
2400	54,1	64,2	72

На початку процесу в сушарці із РТС відбувається інтенсивне пароутворення над поверхнею зерна. Температура зернового шару збільшується, що пов'язане зі зменшенням кількості вологи в зерні. Зерно сушили до стану нижче рівноважної вологості. Рівноважна вологість зерна для умов проведення експериментів 14...16%. Період нагрівання для пшениці триває близько 1000 с, для різних температур поверхні РТС. Після чого температура зерна стабілізується. Температури зерна в деяких експериментах перевищують технологічно припустимі при сушінні пшениці. Так, при температурах конденсатора РТС 100...120 $^\circ C$ відбувається перегрівання зерна вище 60 $^\circ C$, що перевищує технологічні вимоги. Такі режими обрані для того, щоб максимально розширити діапазон експериментальних значень, визначити можливість експериментальної установки. Для зручності аналізу динаміки нагрівання різних зернопродуктів, температурні дані при однаковій температурі поверхні РТС і частоті обертання ($T_{п}=100\ ^\circ C$, $n = 14$ об/хв.) представлено в одній таблиці. Період прогріву гороху триває близько 2000 с, зерна пшениці – 1000 с. У порівнянні з іншими зернопродуктами, амарант прогривається найбільш динамічно. Якщо порівнювати з іншими зернопродуктами, то прогрів амаранту відбувається в 3,3 рази швидше гороху, в 1,7 разів швидше пшениці, що пояснюється його теплофізичними властивостями, а також розміром зерен (табл. 5).

Таблиця 5

Порівняння температур і динаміки нагрівання

Амарант		Горох		Пшениця	
τ, c	$T_{пр}, ^\circ C$	τ, c	$T_{пр}, ^\circ C$	τ, c	$T_{пр}, ^\circ C$
0	18	0	12	0	24
300	60	600	48,5	600	54,9
600	75	1200	62,7	1200	65
900	77	1800	67,3	1800	70,3
1200	77	2400	68,9	2400	72

Максимальна швидкість сушіння пшениці (0,17 %/хв.) в серії всіх експериментів отримана за умов $T_{\text{п}}=142,9^{\circ}\text{C}$.

При сушінні вареного гороху в апараті з РТС сполучаються два технологічних процеси – сушіння й плющення вареного гороху. Перевірено ступінь подрібнювання гороху й відповідність гранулометричного складу даного продукту технологічним вимогам. Дослідження гранулометричного складу проведено за методом ситового аналізу. Аналіз даних показує, що продукт після сушіння в апараті із РТС містить більший відсоток менших фракцій, що задовольняє технологічні потреби виробництва (табл. 6).

Таблиця 6

Гранулометричний склад гороху після сушіння

№ сита	Вміст частинок %	
	в стрічковій сушарці	в апараті із РТС
5	8,2	5,0
4,5	9,7	6,4
4	15,3	13,4
3	26,5	27,0
2,5	22,0	24,8
2	12,4	14,7
1	6,0	8,7

Проведено експерименти по сушінні просо в апараті з РТС. Сушіння просо проходить практично в першому періоді, що пов'язане з розміром часток і здатністю матеріалу втримувати вологу. Зміна температури матеріалу практично не робить впливу на швидкість процесу. Швидкість сушіння просо в апараті із РТС становить близько 0,004 %/с. Для порівняння проведені експерименти по сушінню просо в конвективній сушарці при однаковій температурі продукту (60°C). Швидкість сушіння просо в конвективній сушарці становить близько 0,002 %/с, що в 2 рази нижче швидкості сушіння в апараті із РТС.

У цьому розділі «Експериментальні дослідження процесів теплообміну при термообробці ННР в ТМА на базі РТС» наведені результати досліджень, які проведені на експериментальних стендах кафедри процесів обладнання і енергетичного менеджменту ОНАХТ. Отримані закономірності з кінетики теплообміну, випарювання залежно від типу продукту, а також від конструктивних параметрів РТС. Досліджено вплив кута нахилу РТС, частоти обертання РТС, витрат й властивостей продукту на інтенсивність тепловіддачі. Проведено комплексні експериментальні дослідження з випарювання яблучного пюре в апараті із РТС. Термограми й зміни сухих речовин (СР) від тривалості процесу побудовані в одній координатній сітці. Концентрація при випарюванні яблучного пюре при частоті обертання РТС $n=14$ об/хв, і куті нахилу $\gamma=30^{\circ}$ збільшується, наближаючись до теоретичної границі (рис. 20а). При зміні кута нахилу РТС з $\gamma=30^{\circ}$ до $\gamma=45^{\circ}$ період нагрівання розчину до температури кипіння при інших рівних параметрах зменшується у 2 рази (рис. 20 б). При збільшенні кута нахилу РТС поліпшуються внутрішні гідродинамічні умови для повернення конденсату у випарник РТС.

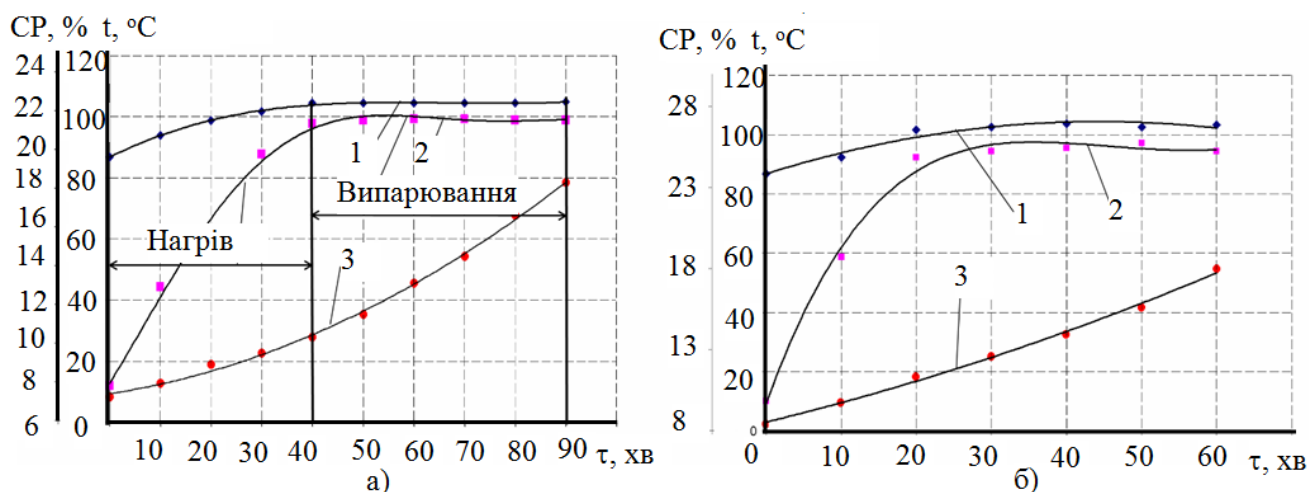


Рис. 20. Зміна вмісту СР і термограми при випарюванні яблучного пюре, $n = 14$ об/хв: а) $\gamma=30^\circ$, б) $\gamma=45^\circ$; 1 – температура поверхні РТС; 2 – температура продукту; 3 – концентрація сухих речовин.

Відповідно зменшується термічний опір стінки конденсатора. Коефіцієнт теплопередачі зростає.

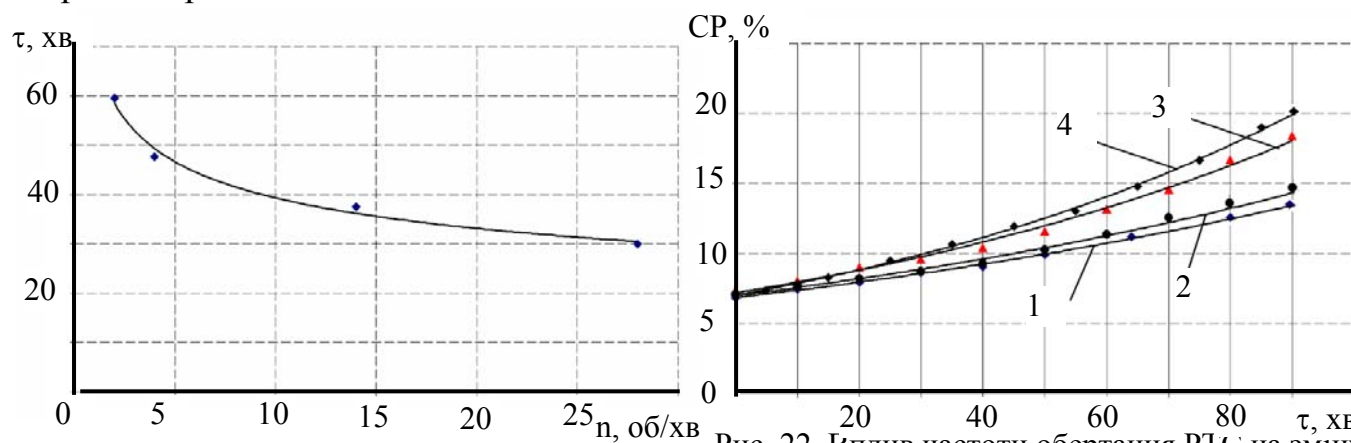


Рис. 21. Вплив частоти обертання РТС на тривалість нагрівання яблучного пюре до температури кипіння, $\gamma=30^\circ$.

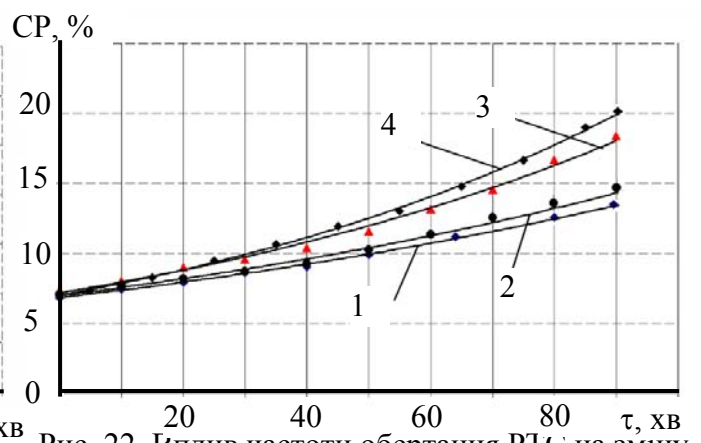


Рис. 22. Вплив частоти обертання РТС на зміну вмісту СР яблучного пюре, $\gamma=30^\circ$: 1 - $n=2$ об/хв; 2 - $n=4$ об/хв; 3 - $n=14$ об/хв; 4 - $n=28$ об/хв.

Вплив частоти обертання РТС на тривалість нагрівання яблучного пюре до температури кипіння при куті нахилу 30° показано на рис. 21. Зміна частоти обертання в 14 разів прискорює процес нагрівання в 2 рази. Інтенсивне руйнування приграничного теплового шару безпосередньо поверхнею теплопередачі призводить до зменшення зовнішнього термічного опору. Зростає коефіцієнт теплопередачі залежно від частоти обертання РТС. Теплота в розчин передається більш ефективно. Інтенсифікація процесу теплообміну впливає не на температуру кипіння розчину, а на швидкість випарювання води з розчину. Проведено дослідження з випарювання томатної маси в апараті із РТС. Максимальна концентрація сягала 18,5 % СР (рис. 22). Період нагрівання томатної маси до температури кипіння близько 30 хв, після чого відбувається випарювання води з поверхні. Томатна маса випаровується при атмосферному тиску. Спостерігається випарювання води в період нагрівання розчину до температури кипіння. Швидкість видалення води в період нагрівання нижче, ніж під час інтенсивного кипіння розчину.

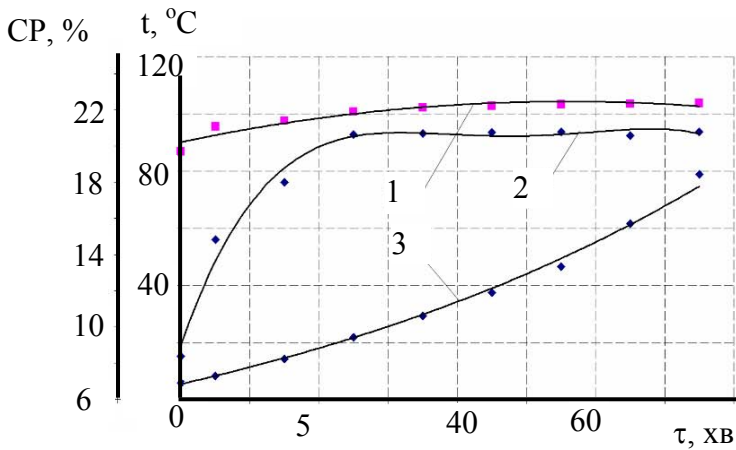


Рис. 23. Зміна концентрації СР і термограми при випарюванні томатної маси, $n= 28$ об/хв, $\gamma=45^\circ$: 1 – температура поверхні РТС; 2 – температура продукту; 3 – концентрація сухих речовин.

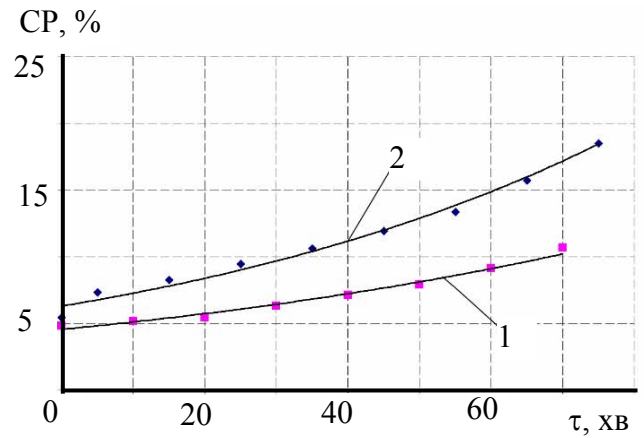


Рис. 24. Вплив частоти обертання РТС на зміну концентрації СР при випарюванні томатної маси, $\gamma=30^\circ$: 1 - $n= 4$ об/хв; 2 - $n= 28$ об/хв.

При зміні кута нахилу РТС з $\gamma=30^\circ$ до $\gamma=45^\circ$ (рис. 23) період нагрівання томатної маси до температури кипіння при інших рівних параметрах зменшується до 30 хв. При обробці томатної маси підвищення частоти обертання конденсатора в 7 разів призводить до підвищення вмісту сухих речовин у продукті в 1,7 разів. Залежність зміни швидкості СР від частоти обертання при випарюванні томатної маси показана на рис. 24. Визначено коефіцієнти тепловіддачі до продукту (α) при випарюванні томатної маси, яблучного пюре. Побудовано залежності α від частоти обертання (рис. 25), в'язкості розчину (рис. 26).

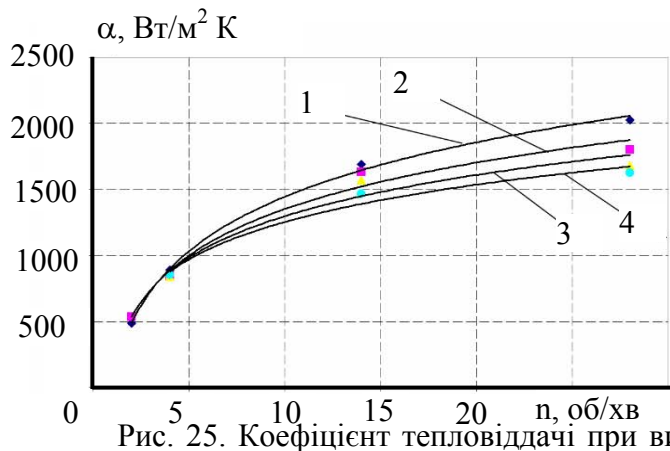


Рис. 25. Коефіцієнт тепловіддачі при випарюванні яблучного пюре, $\gamma=30^\circ$: 1 - 10,5 %, 2 - 11,5 %, 3 - 14,5 %, 4 - 17,5 % СР.

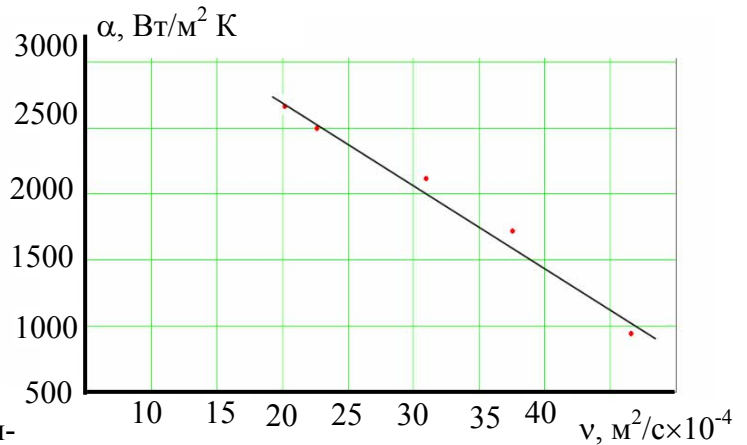


Рис. 26. Вплив концентрації яблучного пюре на коефіцієнт тепловіддачі.

Для досліджуваних рідин спостерігається ріст α зі збільшенням частоти обертання РТС; зі збільшенням кута нахилу РТС. Збільшення концентрації розчину призводить до збільшення його в'язкості й зменшенню α .

У восьмому розділі «Інженерні методи розрахунку й оптимізації термомеханічних агрегатів і рекуперативних сушарок» проведено узагальнення отриманих експериментальних даних та розроблено методики для розрахунку та оптимізації розроблених апаратів. Експериментальні дані, отримані при випарюванні томатної маси та яблучного пюре, є вихідними для математичного моделювання. Узагальнення результатів досліджень представлені в логарифмічних координатах (рис. 27, 28).

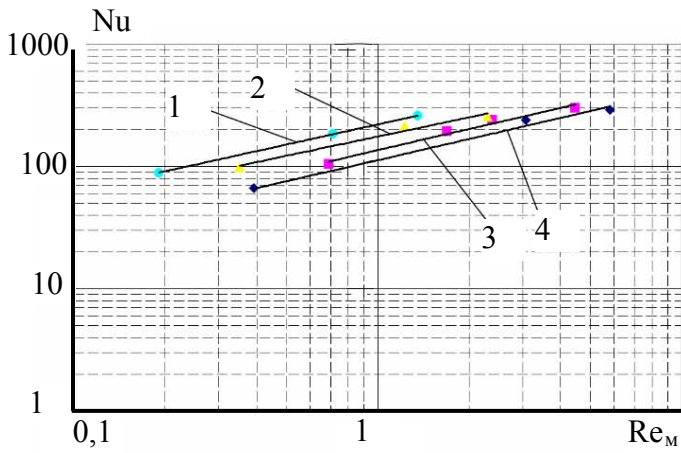


Рис. 27. Залежність $Nu=f(Re_M)$ при випарюванні яблучного пюре, $\gamma=30^\circ$: 1 – 10,5 % СР, 2 – 11,5 % СР, 3 - 14,5 % СР, 4 - 17,5 % СР.

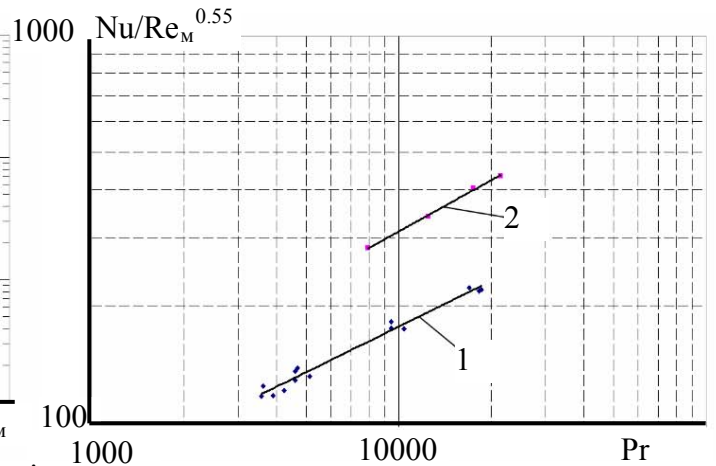


Рис. 28. Залежність $Nu / Re_M^{0,55} = f(Pr)$ при випарюванні яблучного пюре: 1 - $\gamma=30^\circ$; 2 - $\gamma=45^\circ$.

Визначено коефіцієнти рівняння в числах подібності для розрахунку числа Нусельта для конденсатора, що обертається:

$$Nu_n = 0,2 (1+Re_M)^{0,8} (1+Re_1)^{0,33} Pr^{0,43} (\gamma/\gamma_0)^{0,6} \quad (17).$$

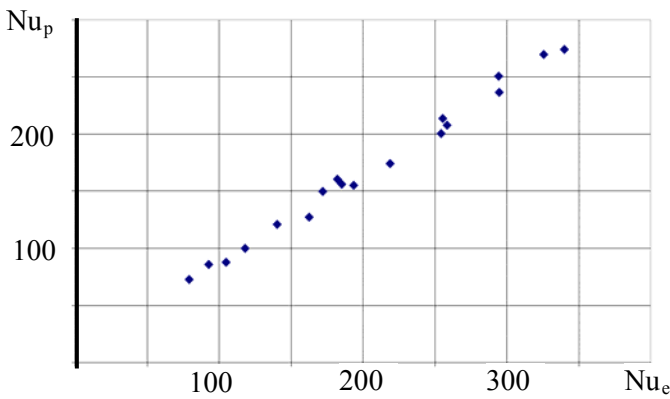


Рис. 29. Порівняння експериментальних і розрахункових даних.

З використанням формул (17) отримані розрахункові числа Нусельта (Nu_p). Розбіжність між розрахунковими й експериментальними числами Нусельта (Nu_e) в межах 15 % (рис. 29). Рівняння (17) є базовими при розрахунку апарата й комп'ютерному моделюванні. Алгоритм розрахунку випарного апарата на базі РТС представлений як сукупність окремих блоків (рис. 30). Після введення вхідних параметрів (блок 1) відбувається розрахунок теплофізичних властиво-

стей продукту, тепловий розрахунок апарата. У блоці 5 відбувається розрахунок критичного числа Фруда (Fr). Якщо необхідна умова виконується ($Fr < Fr_k$), працює блок 6, у протилежному випадку вважаємо, що досягнуто кризу теплопередачі у РТС, програма завершує свою роботу.

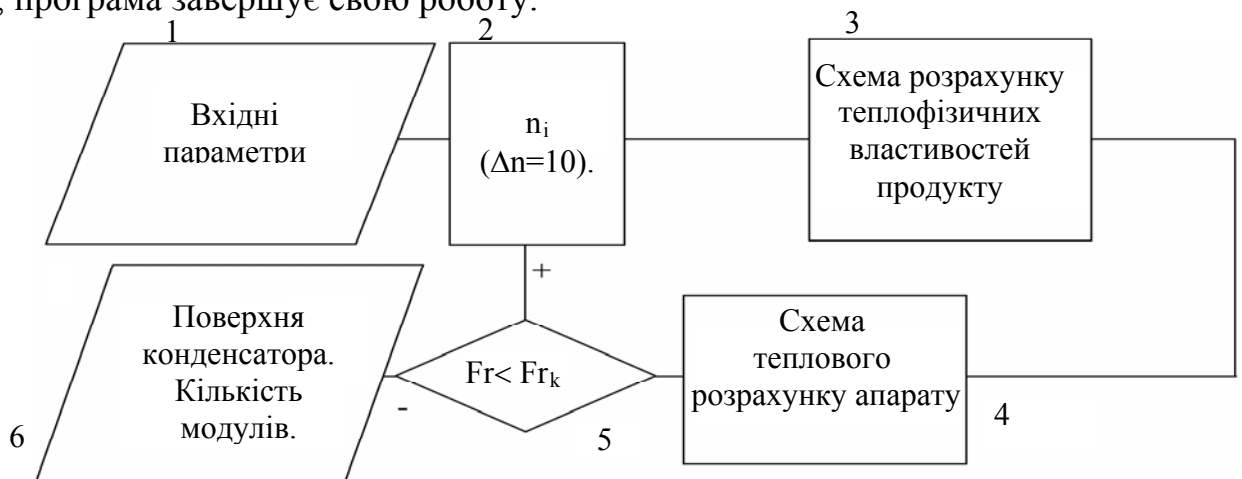


Рис. 30. Загальний алгоритм розрахунку апарату на базі РТС.

Основним є блок 4, у якому відбувається тепловий розрахунок апарата (рис. 31). Метою розрахунку є визначення необхідної теплопередаючої поверхні конденсатора РТС, кількості модулів конденсатора.

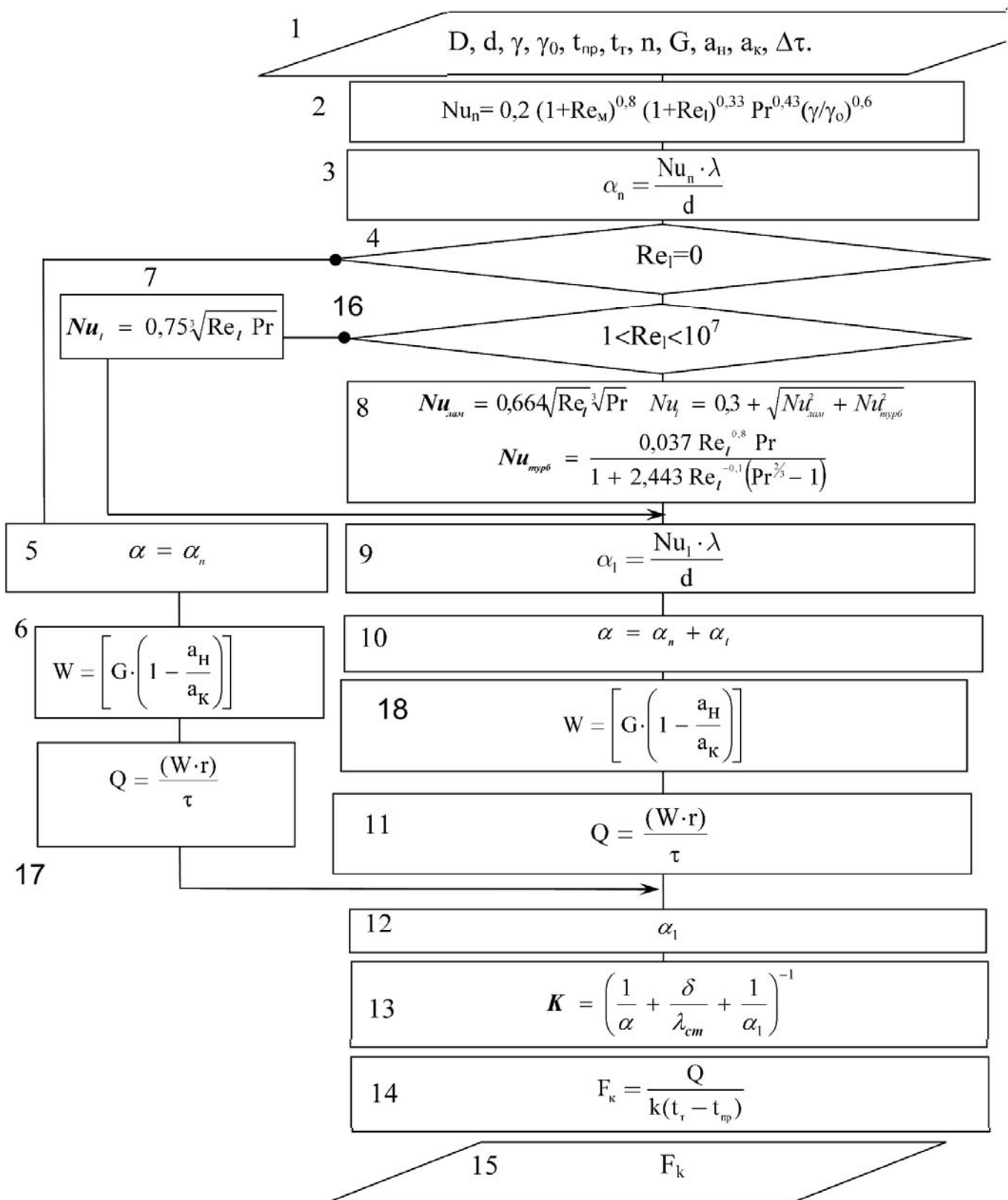


Рис. 31. Блок-схема теплового розрахунку апарата.

Вхідними даними для розрахунку є: D – діаметр конденсатора, [м], задається конструктивно; d – діаметр трубки конденсатора, [м], задається конструктивно; γ – кут нахилу конденсатора РТС; γ_0 – базовий кут нахилу конденсатора РТС; $t_{пр}$ – температура продукту, [°С]; t_t – температура теплоносія, [°С]; n – частота обертання конденсатора, [об/хв]; ρ , λ , μ , Pr , C_p – теплофізичні властивості продукту, G – маса продукту (для апарата періодичної дії, [кг], витрати продукту для апарата безперервної дії, [кг/с]; $\Delta\tau$ – тривалість нагрівання продукту (для апарата періодичної дії) [с]; a_n , a_k – початкова та кінцева концентрація продукту, [%].

В основу програми покладене рівняння в числах подібності, отримане при узагальненні експериментальних даних (17).

У блоці 2 програми відбувається розрахунок Re_l і Re_m – лінійного й модифікованого чисел Рейнольдса відповідно; числа Нусельта для конденсатора, що обертається – Nu_n . Визначальним розміром для Re_l , Nu_n є половина довжини обтікання трубки конденсатора d . Для Re_m – визначальним розміром є діаметр конденсатора D . У блоці 3 відбувається розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при перемішуванні α_n . У блоці 4 відбувається перевірка.

Якщо лінійний рух продукту відсутній ($G=0$, $Re_l=0$ – апарат періодичної дії), виконуються блоки 5, 6, 17. Визначається кількість видаленої із продукту вологи (W), теплоти (Q) на випарювання вологи з продукту за певний проміжок часу τ , після чого програма повертається в основну гілку. Якщо апарат безперервної дії ($Re_l>0$), розраховується лінійне число Нусельта: за умови $1 < Re_l < 10^7$ в блоці 16, за умови $Re < 1$ блоці 8.

У блоці 9 визначається коефіцієнт тепловіддачі при лінійному русі продукту α_1 . У блоці 10 визначається сумарний розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі α . У блоці 12 визначаємо коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари теплоносія α_1 , у блоці 13 розраховуємо коефіцієнт теплопередачі K . Вихідний результат розрахунку одержуємо в блоках 14, 15 (рис. 31). Кількість модулів одержуємо розподілом загальної поверхні конденсатора F_k на поверхню одного модуля F . Загальний алгоритм розрахунку випарного апарата із РТС реалізований в інструментальній оболонці Math Cad. Програма дає високу ступінь точності при розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі.

Для рекуперативної сушарки узагальнення дослідних даних по механіці обтікання та кінетиці сушіння проведено в числах подібності. Отримано коефіцієнти в рівнянні по визначенню ступені змішування для круглого та плоского ТС (21). Вхідними даними для обробки є експериментальні дані. Обробку даних представлено в логарифмічних координатах. В результаті послідовно отримано вплив кожного комплексу на процес (рис. 32, 33). Отримано коефіцієнти рівняння в числах подібності для розрахунку числа Нусельта дифузійного (18). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 15 %. Аналогічно отримано показники степені в рівнянні для визначання безрозмірної вологості (19). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 20 %.

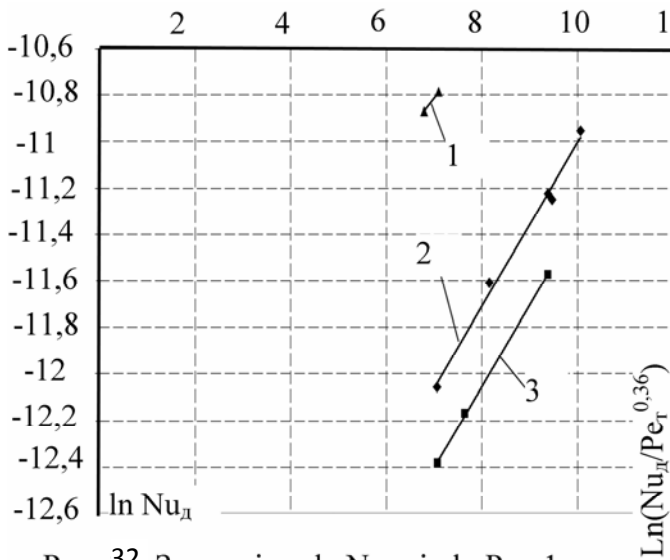


Рис. 32 Залежність $\ln Nu_d$ від $\ln Pe_T$: 1 – $T_n=142,9\text{ }^\circ\text{C}$; 2 - $T_n=133,5\text{ }^\circ\text{C}$; 3 - $T_n=120,2\text{ }^\circ\text{C}$.

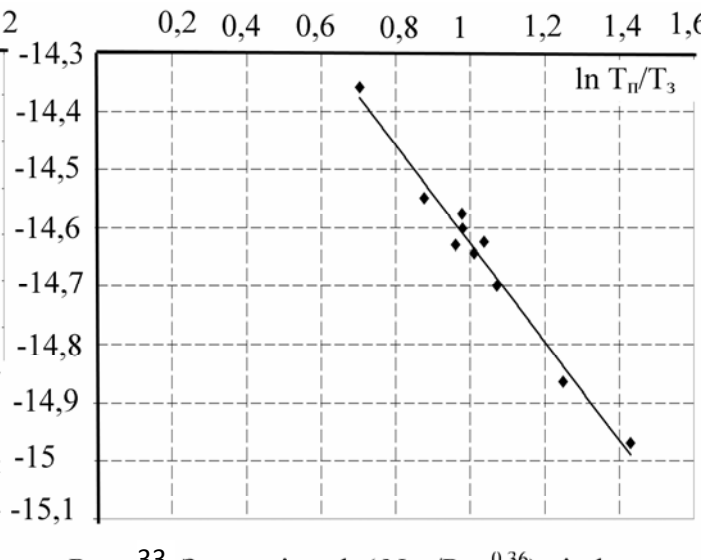


Рис. 33 Залежність $\ln(Nu_d/Pe_T^{0.36})$ від $\ln(T_n/T_3)$.

Узагальнення даних по питомим енерговитратам проведено із застосуванням програми MathCad (20). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 18 %. Алгоритм розрахунку сушильної установки представлено як сукупність окремих блоків (рис. 34).

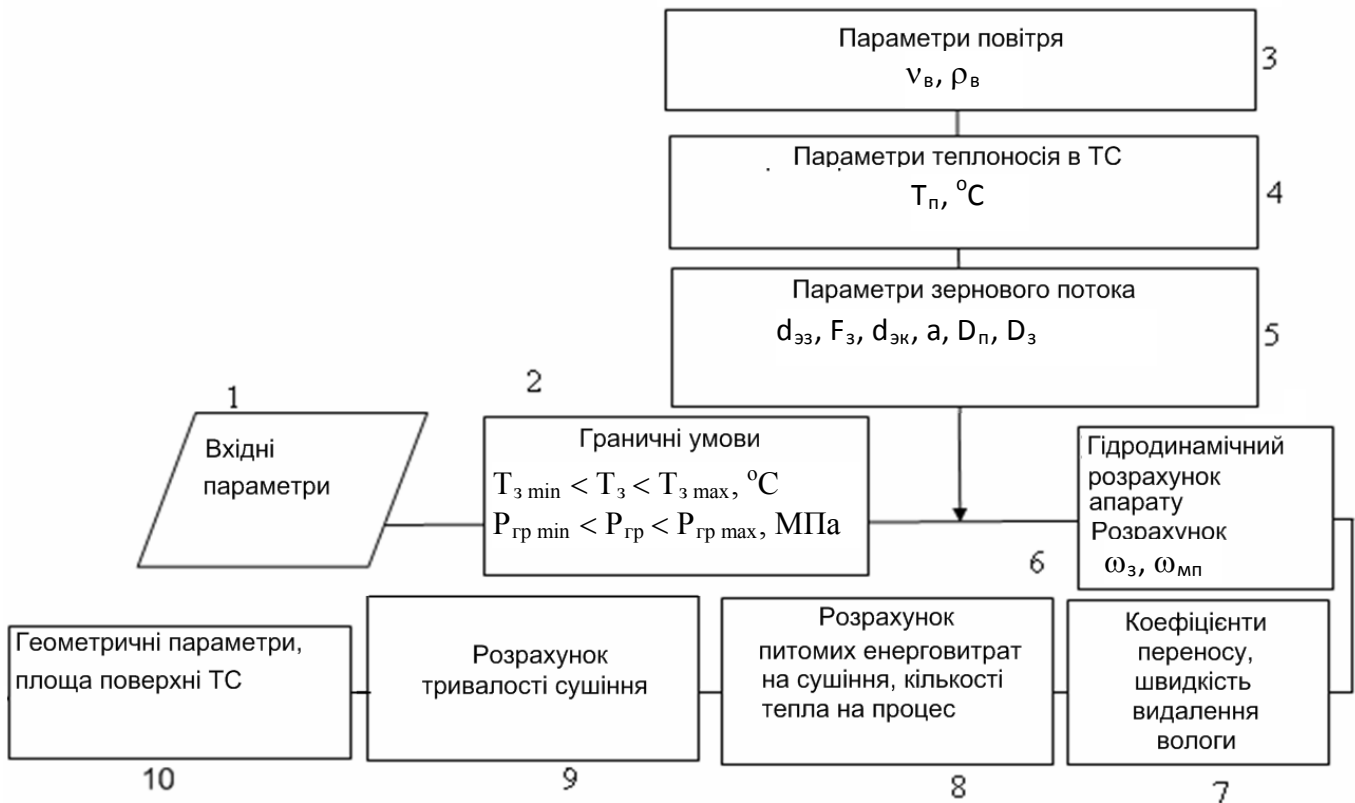


Рис. 34. Алгоритм розрахунку рекуперативної сушильної установки.

У блоці 3 розраховано теплофізичні параметри повітря, що рухається в міжзерновому просторі. У блоці 4 розраховано параметри теплоносія в конденсаторі ТС. У блоці 5 визначено параметри зернового потоку. Дані блоків 3 – 5 є вихідними для подальших розрахунків. У блоці 6 відбувається гідродинамічний розрахунок апарату, результатом якого є $\omega_z, \omega_{m.p.}$ У блоках 7, 8, 9 використано критеріальні рівняння (18 - 20) отримані після узагальнення експериментальних даних. В блоці 9 розрахо-

вано загальну кількість тепла на процес. У блоці 10 розраховано геометричні параметри апарату. Результатом розрахунку є геометричні параметри сушарки, площа поверхні ТС. Діапазон комп'ютерного моделювання наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Діапазон комп'ютерного моделювання

Позначення	Розмірність	Найменування	Значення
G_3	кг/с	Витрати зерна в сушарці	0,01...0,5
T_3	°C	Температура зернового потоку	45...90
u	%	Вологість зерна	13...20
$P_{гр}$	МПа	Тиск у модулі ТС	0,1...0,4
ω_B	м/с	Швидкість повітря на виході із сушарки	2,5...22,5

При комп'ютерному моделюванні діапазон температур зернового потоку, тиску у модулі ТС, швидкостей повітря виходить за межі експериментальних значень. Визначено вплив витрат зернового потоку, температури зернового потоку на процес масовіддачі. Температура зернового потоку варіювалася з інтервалом 5°С.

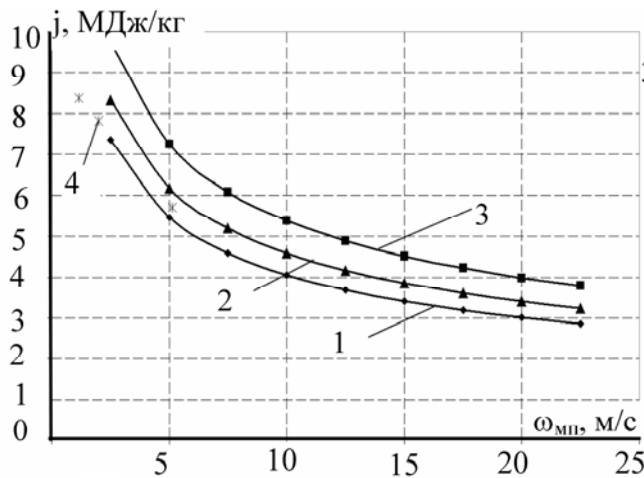


Рис. 35. залежність питомих енерговитрат від швидкості повітря в міжзерновому просторі: 1 – $T_n = 142,9$ °C; 2 – $T_n = 120,2$ °C; 3 – $T_n = 99,6$ °C; 4 – експериментальні дані, $T_n = 120,2$ °C.

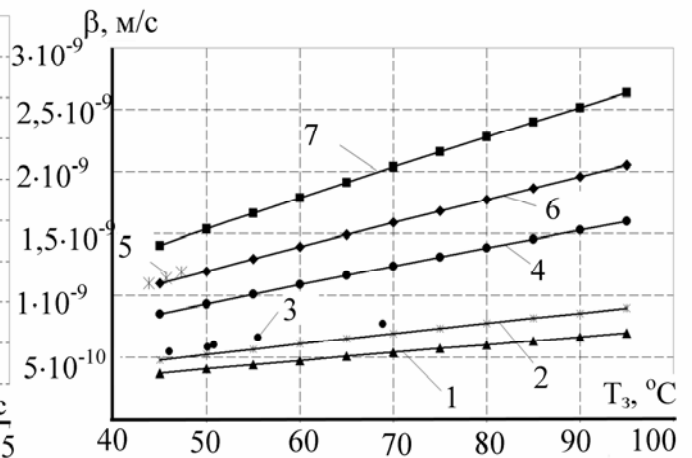


Рис.36. Вплив температури зернового потоку на коефіцієнт масовіддачі: 1 - $G_3=0,01$ кг/с; 2 - $G_3=0,02$ кг/с; 3 - $G_3=0,02$ кг/с, експериментальні дані; 4 - $G_3=0,1$ кг/с; 5 - $G_3=0,2$ кг/с, експериментальні дані; 6 - $G_3=0,2$ кг/с; 7 - $G_3=0,4$ кг/с.

Діапазон температур зернового потоку перевищує гранично допустимі температури для зерна. Для порівняння на графік нанесені значення коефіцієнтів масовіддачі, отримані для різних витрат зернового потоку в ході експериментів (рис. 36). Збільшення швидкості повітря призводить до інтенсифікації процесу видалення вологи із сушарки й до зменшення питомих енерговитрат на сушіння (рис. 35). Проведено комп'ютерне моделювання тривалості процесу сушіння за допомогою програми MathCad з використанням рівняння (19). Проведено оптимізацію конструкції випарного апарату на базі РТС. Метою оптимізації є визначення частоти обертів РТС,

при якій енерговитрати на процес випарювання будуть мінімальні. Цільова функція являє собою суму енерговитрат на привід РТС ($N_{дв}$) і енерговитрат на випарювання (Q_n). Оптимізація проведена при наступних параметрах апарата (табл. 8).

Таблиця 8

Параметри оптимізації

Параметр	Значення
Частота обертання РТС, c^{-1}	0,017...2,5
Діаметр РТС, м	1
Кут нахилу РТС, град	90
Продукт	Томатна маса
Концентрація продукту початкова, %	5
Концентрація продукту кінцева, %	25
Завантаження апарата, кг	500
Температура теплоносія, $^{\circ}C$	100
Температура продукту, $^{\circ}C$	90

Мінімум цільової функції дасть нам частоту обертання РТС, при якій енергетичні витрати на процес будуть мінімальними. Вихідними даними для розрахунку по алгоритму є: геометричні розміри РТС, температури продукту, теплоносія, кут нахилу РТС, кількість і концентрація вихідного продукту. Результат оптимізації апарата із РТС представлений на рис. 37, 38.

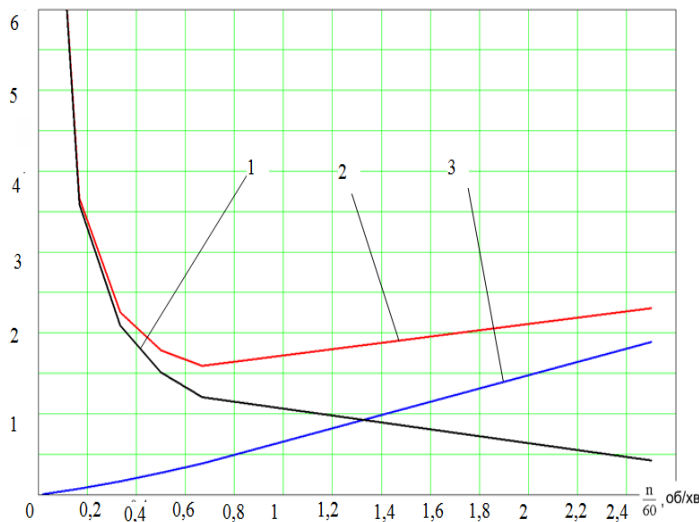
 $N_{дв}, Q_n, Z, Дж \cdot 10^8$


Рис. 37. Оптимізація випарного апарата із РТС: 2 – цільова функція Z ; 1 – витрати енергії на випарювання продукту; 3 – витрата енергії на привід РТС.

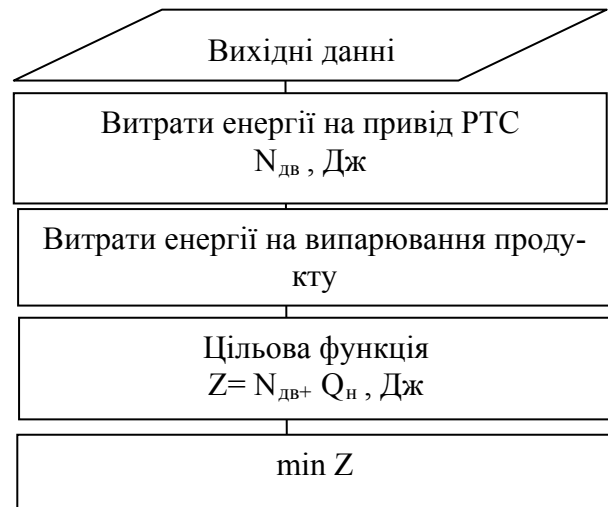


Рис. 38. Блок-схема оптимізації випарного апарата на базі РТС.

Цільова функція (Z) являє собою суму енерговитрат на привід РТС ($N_{дв}$) й енерговитрати на випарювання (Q_n). Мінімум цільової функції припадає на частоту $n=0,68 c^{-1}$. Результати узагальнення експериментальних для розроблених конструкцій даних наведено в таблиці 9.

Результати узагальнень експериментальних даних

Апарат	Рівняння	Розрахунок параметра	Межі зміни визначальних чисел подібності, похибка
Рекуперативна сушарка	$Nu_{\delta} = 1.03 \cdot 10^{-6} ((1 + Pe_m^{0.36} \cdot (T_n / T_3)^{-0.84}) \quad (18)$	Коефіцієнт масовіддачі	$1,2 \cdot 10^3 \leq Pe_T \leq 1,3 \cdot 10^4,$ $2,1 \leq T_n / T_3 \leq 4$ $\pm 15 \%$.
	$\left(\frac{u_H}{u_K} \right)_p = 4.632 (Fo_D)^{0.16} \cdot (Bi_D)^{0.13} \quad (19)$	Вологість продукту, тривалість процесу	$5,4 \cdot 10^{-3} \leq Fo_D \leq 1,3 \cdot 10^{-2},$ $2,1 \cdot 10^{-2} \leq Bi_D \leq 10^{-1}$ $\pm 20 \%$.
	$\frac{j}{j_0} = \left[73.5 \cdot (Re_B)^{-0.43} \cdot \left(\frac{T_{сух}}{T_{п}} \right)^{0.85} \right] \quad (20)$	Енерговитрати	$1,9 \cdot 10^2 \leq Re_B \leq 1,3 \cdot 10^3,$ $0,2 \leq T_{сух} / T_{п} \leq 1,5$ $\pm 18 \%$.
	$D = 3.5 \cdot Fr^{0.12} \quad (21)$	Ступінь змішування	$0,001 < Fr < 1$ $\pm 19 \%$.
Сушарка на базі ТМА з РТС	$Nu_D = 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + Pe_T)^{0.5} \cdot \left(\frac{T_n}{T_3} \right)^{0.4} \quad (22)$	Коефіцієнт масовіддачі β	$1,2 \cdot 10^5 \leq Pe_T \leq 1,3 \cdot 10^6,$ $0,4 \leq T_n / T_3 \leq 1,8$ $\pm 19 \%$.
Нагрівач на базі РТС	$Nu_n = 0,1 (Re_m)^{0,4} (1 + Re_l)^{0,33} Pr^{0,43} (\gamma/\gamma_0)^{0,28} \quad (23)$	Коефіцієнт тепловіддачі α	$5,7 \leq Re_l \leq 10$ $2,1 \cdot 10^5 \leq Re_m \leq 6 \cdot 10^5$ $\pm 15 \%$.
Випарний апарат на базі РТС	$Nu_n = 0,2 (1 + Re_m)^{0,8} (1 + Re_l)^{0,33} Pr^{0,43} (\gamma/\gamma_0)^{0,6} \quad (24)$	Коефіцієнт тепловіддачі α	$5,7 \leq Re_l \leq 10$ $2,1 \cdot 10^5 \leq Re_m \leq 6 \cdot 10^5$ $\pm 15 \%$.

У дев'ятому розділі «Впровадження інноваційних проектів у виробництва» виходячи з результатів комп'ютерного моделювання, реалізовано розрахунок апарату для лінії з виробництва томатної пасти, проведено оцінку енергетичної ефективності застосування схеми із РТС у лінії з виробництва томатної пасти. Модель термотрансформації енергії (рис. 39) ілюструє енергетичну ефективність застосування базової схеми з виробництва томатної пасти й схеми із РТС. Показано, як енергія палива трансформується в продукт, модель враховує можливі втрати енергії.

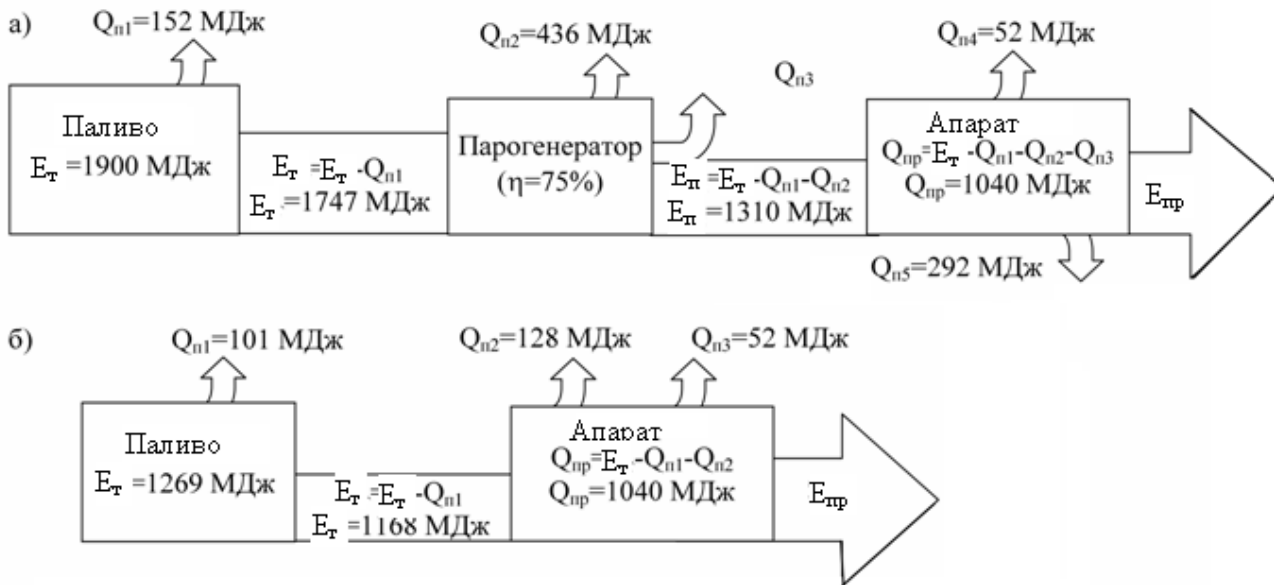


Рис. 39. Модель трансформації, транспортування, втрат енергії: а) базова схема; б) схема із РТС; E_T – енергія палива, Q_{n} – втрати енергії, $E_{пр}$ – енергія передана продукту.

Проведено розрахунок апарату для лінії з виробництва томатної пасти, при початковій концентрації сухих речовин 7 % і кінцевій 25 %.

Таблиця 10

Порівняння технічних характеристик

Схема	Завантаження апарата G	Витрати енергії E_T	Витрати палива		Тривалість циклу τ	Питомі енерговитрати E_y
	кг		кг	%		
Базова	500	1900	47,5	100	4080	3,9
РТС	500	1269	31,7	67	2840	2,6

Як видно з табл. 10, застосовуючи апарат із РТС з тією ж поверхнею нагрівання, можливо досягти інтенсифікації процесу термомеханічної обробки томатної маси в 1,4 рази або скоротити тривалість обробки з 4080 до 2840 с. У такий спосіб застосування схеми із РТС дає можливість знизити витрати енергії, витрати палива, тривалість циклу, питомі енерговитрати. Впровадження апарату з РТС проведено на відкритому акціонерному товаристві «Концерн Хлібпром» на лініях з термообробки в'язких та дисперсних середовищ.

Розроблено проект рекуперативної зерносушарки (табл. 11). Розраховано економічну ефективність впровадження нової системи зерносушіння. Вихідними даними для розрахунків є режимні характеристики, компоновочні параметри зерносушарки. Розрахунок проведено для ДП "Гайсинський комбінат хлібопродуктів" ВАТ «Концерн Хлібпром». Розроблена рекуперативна зерносушарка, продуктивністю 12 т/год. Додаткові капітальні 316800 грн., які окупляться на протязі 3 сезонів.

Таблиця 11

Технічні характеристики рекуперативної зерносушарки

Показники	Сушарки	
	ДСП-12	Рекуперативна сушарка
Продуктивність (при зниженні вологості з 20 до 14 %, т/год)	12	12
Внутрішні розміри шахти, м:		
довжина	3,25	-
ширина (діаметр)	1,0	1,5
висота	12,6	11,2
Кількість зерна в сушильній камері (пшениця з об'ємною вагою 750 кг/м ³), т.	11,9	14,8
Кількість зерна в охолоджувальній камері	6,4	
Тривалість перебування зерна, хв:		
у сушильній камері	59	73,9
в охолоджувальній камері	32	
Параметри модуля конденсатора ТС		
площа поверхні, м ²	-	47
діаметр патрубку ТС d _{тр} , м	-	0,05
Енерговитрати, МДж/кг		
	5	3,54

За результатами експериментів, узагальнення експериментальних даних та комп'ютерного моделювання розроблено експериментальний зразок рекуперативної сушильної установки (рис. 40).

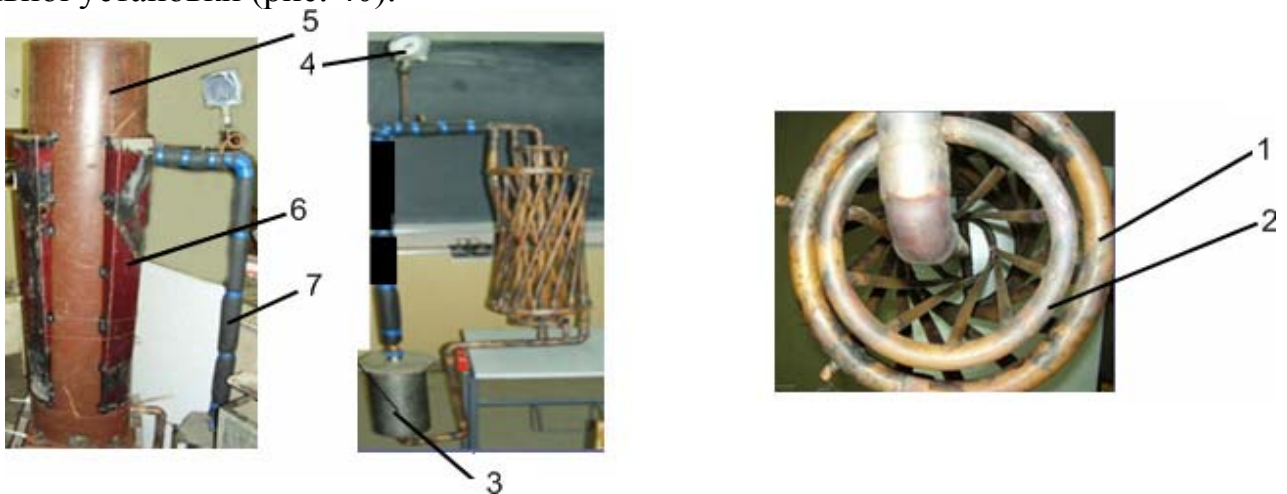


Рис. 40. Експериментальний зразок сушильної установки : 1 – зовнішній контур модуля; 2 – внутрішній контур модуля; 3 – випарник; 4 – манометр; 5 – сушильна шахта; 6 – повітропроводи; 7 – паропровід.

Основними його елементами є: шахта, повітропроводи, конденсатор, парогенератор, паропровід. Теплообмінні трубки виконані з нахилом. Це сприяє перемішуванню зернового потоку й повному контакту теплопередаючої поверхні із продуктом. Кут нахилу труб однаковий, а в сусідніх пучках ТС закручений у протилежних напрямках, що є додатковим чинником перемішування потоку. Щоб уникнути заклинювання зернівок, колектори сусідніх пучків мають різну висоту. Самі пучки підключені паралельно, вихід конденсату здійснюється в загальний колектор рідини.

Питомі енерговитрати $\mathcal{E}_{уд}$, МДж/кг рекуперативної зерносушарки визначалися як

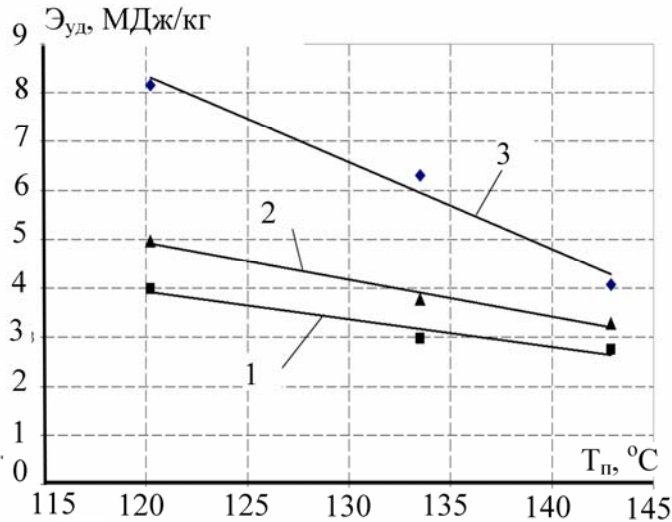


Рис. 41. Залежність питомих енерговитрат від температури поверхні конденсатора ТС: 1 - $\omega_{м.п}=1,6$ м/с, $G_3=0,02$ кг/с; 2 - $\omega_{м.п}=0,4$ м/с, $G_3=0,2$ кг/с; 3 - $\omega_{м.п}=0,4$ м/с, $G_3=0,02$ кг/с

коefficient корисної дії (ККД) становить усього 40 % (рис. 42). Після аналізу експериментальних даних одержано, що в порівнянні з конвективним сушінням у рекуперативної сушарки більша частина енергії (69,4 %) затрачується на випаровування води, на нагрівання продукту 16,3 %, втрати в навколишнє середовище 13,2 %, на підігрів повітря всього близько 1,1 %.

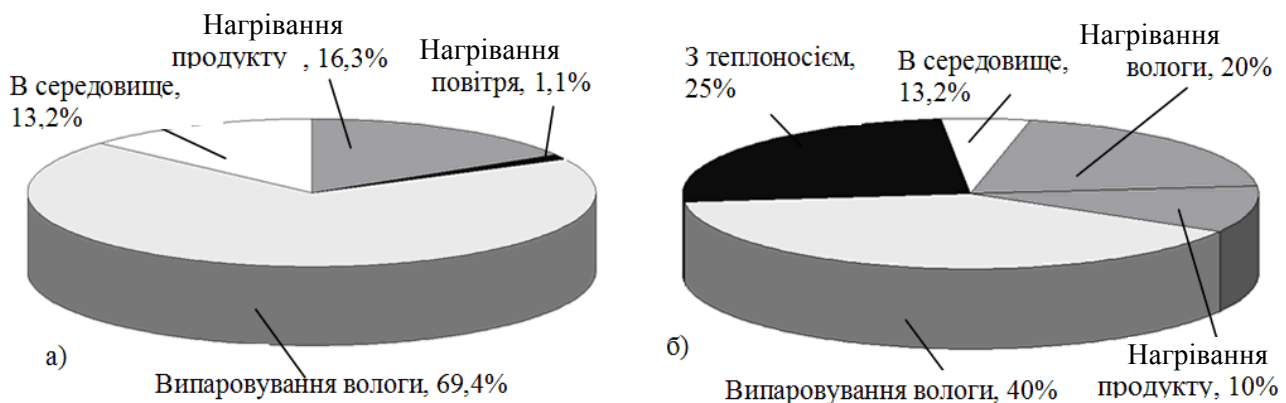


Рис. 42. Розподіл теплової енергії в сушарках: а) рекуперативна сушарка, б) конвективна сушарка.

Розроблено експериментальний зразок сушильної установки для сушіння вареного гороху в умовах харчоконцентратного виробництва (рис. 43).

Технологічна схема виробництва варено-сушеного гороху на підприємстві ПАТ «Enni Foods» передбачає установку двох стрічкових сушарок, що працюють послідовно. Між сушарками відбувається процес плющення гороху. Існує проблема: високе енергоспоживання сушарок і невисока надійність в роботі цих апаратів. Значного скорочення енерговитрат можливо досягти, застосовуючи апарат одночасно як сушарку і як плющитель.

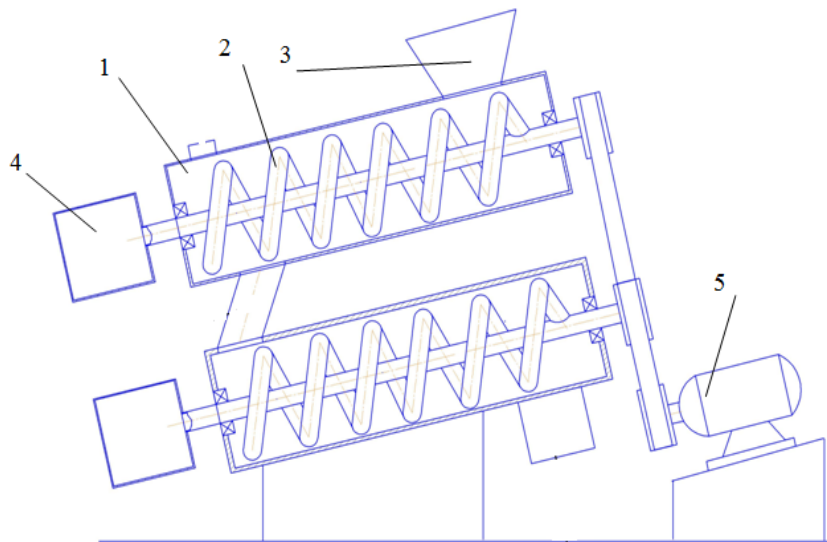


Рис. 43. Експериментальний зразок сушильної установки: 1 – корпус, 2 – конденсатор шнекового РТС, 3 – бункер для завантаження, 4 – випарник РТС, 5 – привід.

Значного зниження енерговитрат можна досягти шляхом модернізації промислової виробничої лінії з виготовлення круп, що не потребують розварювання, застосовуючи розроблену конструкцію ТМА з РТС замість стрічкових сушарок. При сушінні розвареного продукту в розробленій конструкції сполучаються два технологічних процеси – сушіння й плющення.

Значного зниження енерговитрат можна досягти шляхом модернізації про-

мислової виробничої лінії з виготовлення круп, що не потребують розварювання, застосовуючи розроблену конструкцію ТМА з РТС замість стрічкових сушарок. При сушінні розвареного продукту в розробленій конструкції сполучаються два технологічних процеси – сушіння й плющення.

На рисунку 44 у схематичному вигляді наведено питомі енерговитрати лінії виробництва круп, що не потребують розварювання із застосуванням стрічкових сушарок (а), із застосуванням ТМА з РТС як сушарку (б).

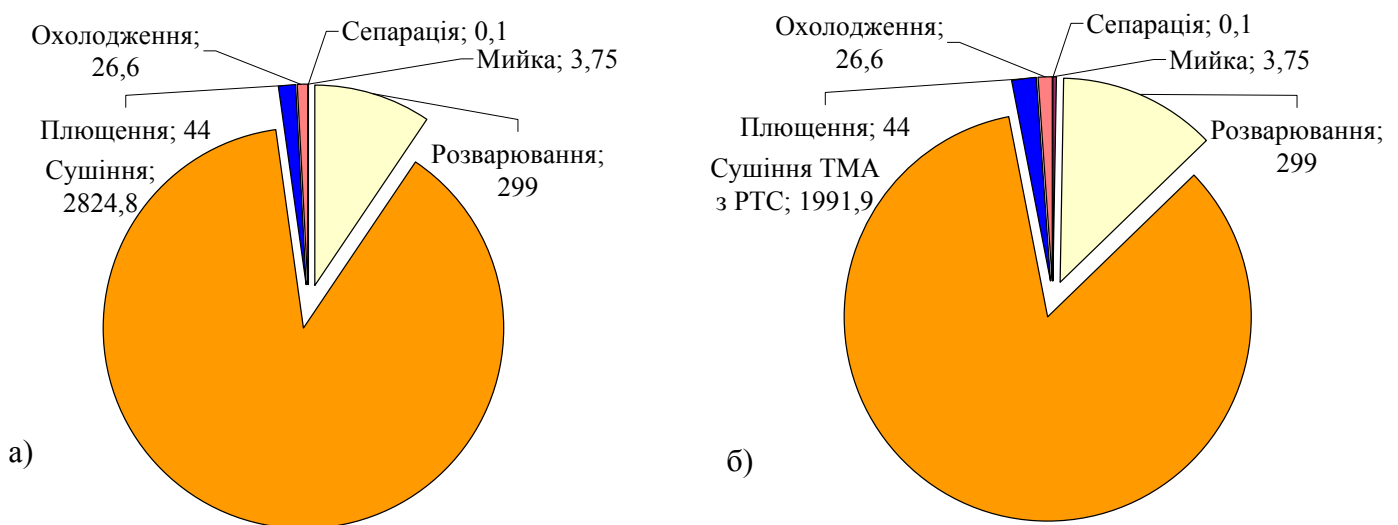


Рис. 44. Питомі енерговитрати лінії виробництва круп, що не потребують розварювання, кДж/(кг продукції): а) із застосуванням стрічкових сушарок; б) із застосуванням ТМА з РТС в як сушарки.

Енерговитрати на процес сушіння на модернізованій лінії виробництва круп, що не потребують розварювання із застосуванням ТМА з РТС зменшуються з 2824,8 кДж/(кг продукції) до 1991,9 кДж/(кг продукції). Апарат ефективно працює в якості плющителя. Також було досліджено застосування ТМА з РТС у якості плющителя й сушарки одночасно з вилученням з технологічної лінії плющильного верстата. При використанні ТМА з РТС також в якості плющителя енерговитрати лінії зменшуються з 2365,4 кДж/(кг продукції) до 2321 кДж/(кг продукції).

Розроблено функціональну схему сушарки, наведено опис конструктивних рішень зерносушарки на базі термосифонів, продуктивністю 6 т/ч, з термосифонним шаровим підігрівачем зерна й теплогенератором, що забезпечує екологічно безпечну технологію сушіння. Блок-схему зерносушарки представлено на рис. 45.

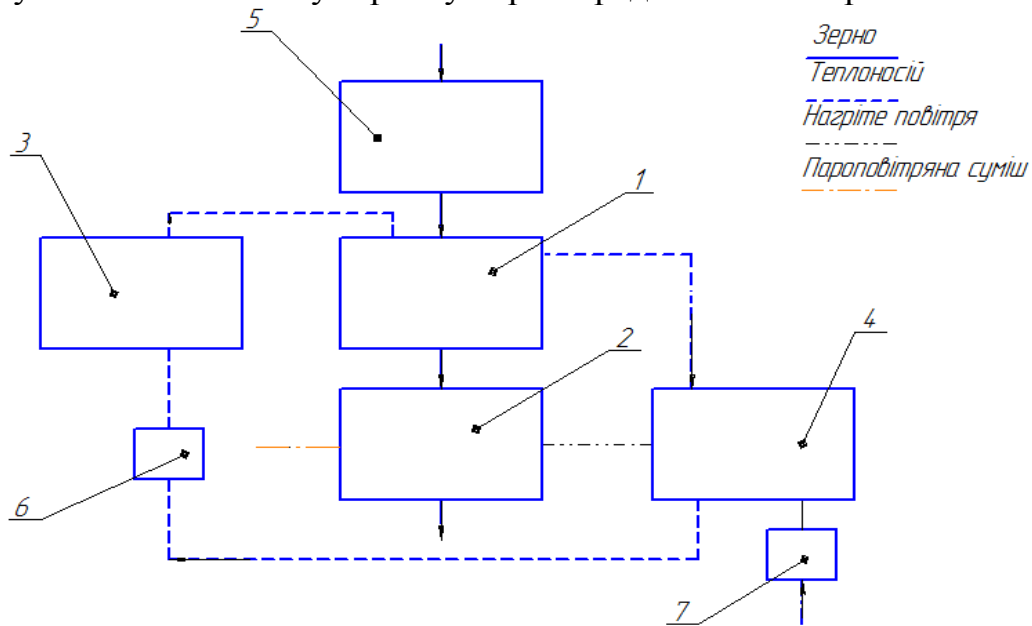


Рис. 45. Блок-схема зерносушарки на базі ТС: 1 – шаровий підігрівач; 2 – сушильна камера; 3 – теплогенератор, 4 – калорифер; 5 – норія для завантаження продукту; 6,7 – вентилятор.

Підстава для проведення робіт: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 вересня 2017 р. № 669-р “Про затвердження переліку найважливіших науково-технічних (експериментальних) розробок за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію у 2017 – 2018 роках.” Зерносушарка працює наступним чином. Норія 5 завантажує зерно у шаровий підігрівач 1. Зерно у підігрівачі рухається щільним гравітаційним шаром, підігрівається і потрапляє в сушильну шахту, яку виконано по аналогії з базовими конвективними зерносушарками. Зерносушарка використовує в якості агенту сушіння нагріте чисте атмосферне повітря. Конструкція забезпечує питомі витрати теплової енергії не більше 3,5 МДж/кг видаленої вологи. Коефіцієнти тепловіддачі в шаровому підігрівачу від поверхні термосифонів до зернового потоку у межах 30...100 Вт/(м² К). Термін окупності сушарки становить не більше 3 сезонів.

Розроблено конструкцію і виготовлено основні вузли дослідного зразку сушарки на базі ТС (рис. 46). Конструкторська документація представлена у додатках дисертаційної роботи.



Рис. 46. Основні елементи зерносушарки на базі ТС: а) шаровий підігрівач із захисними кожухами, б) шаровий підігрівач, захисні кожухи знято; в) секція сушильної шахти вид збоку; г) секція сушильної шахти вид зверху; д) термосифонний калорифер; 1 – захисний кожух, 2 – випарна ділянка термосифонів, 3 – конденсаційна ділянка термосифонів, 4 – рама, 5 – канали для відведення вологого повітря, 6 – ребрені термосифони.

Зерносушарка забезпечує відсутність канцерогенних компонентів палива у зерні, підвищення якості зерна.

Ефективність роботи розробленого обладнання представлено в табл. 12.

Таблиця 12

Енерговитрати та ефективність розробленого обладнання

Процес	Апарат	Ефект	
Нагрівання ННР	ТМА з РТС	$\alpha/\alpha_0=2\dots 20$	Зниження енерговитрат до 30 %
Випарювання ННР	ТМА з РТС	$\alpha/\alpha_0=4,5$	
Сушіння дисперсних продуктів	Рекуперативна сушарка	3,2 МДж/(кг вид. вологи)	
Сушіння дисперсних продуктів	Рекуперативна сушарка з утилізацією енергії відпрацьованого повітря	3 МДж/(кг вид. вологи)	
Сушіння дисперсних продуктів	ТМА з РТС	3,5 МДж/(кг вид. вологи)	

Розроблені конструкції інноваційного обладнання забезпечують наступний ефект. При нагріванні ННР в термомеханічних агрегатах на базі РТС процес термообробки інтенсифікується від 2 до 20 разів. При випарюванні ННР інтенсифікація процесу складає до 4,5 разів. При одночасному зниженні енерговитрат до 30%. Забезпечується чистота поверхні та легкий вихід парової фази із продукту. В зерносушарках на базі ТС та РТС енерговитрати складають 3...3,5 МДж/(кг вид. вологи), що практично в 2,5 рази нижче енерговитрат конвективних зерносушарок.

ВИСНОВКИ

В роботі сформульовано гіпотези, що технічною базою для удосконалення технологій сушіння, концентрування, термообробки можуть стати сучасні способи ефективної теплопередачі ТТ, ТС, РТС, а також апарати на їх основі. Створено науково-технічні основи для розробки нового класу обладнання: рекуперативних сушарок і термомеханічних агрегатів для обробки в'язких і дисперсних харчових продуктів та запропоновано інноваційне обладнання.

1. Методами енергетичного та екологічного менеджменту встановлено, що технології ключових операцій виробництва харчових продуктів – концентрування, термообробка, сушіння відрізняються високою енергоємністю. На вітчизняному ринку імпорту сушених продуктів займає 95 %, вітчизняні заводи-виробники практично відсутні. Аналіз стану зерносушильної техніки показує, що в 48% випадків експлуатуються шахтні агрегати вітчизняного виробництва. ККД таких установок до 30%. Сушильні технології споживають в 2,5...3 рази більше енергії, ніж фізично необхідно. В Україні при виробництві концентратів щорічно випарюється від 1,0 млн. т. до 1,5 млн. т. води, що в грошовому еквіваленті становить 300-400 млн. грн. Високі енерговитрати при обробці харчових продуктів, викликають необхідність пошуку нових способів та розробки інноваційного обладнання.

2. Розроблено фізичну схему і математичну модель для внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу для системи конденсатор РТС-продукт при випарюванні харчових ННР. Інтенсивність тепловіддачі визначається числами Рейнольдса (лінійного й модифікованого), Прандтля й параметричним комплексом – безрозмірним кутом нахилу конденсатора. Розроблено фізичну схему і математичну модель для задачі тепломасообміну в системі конденсатор рекуперативної сушарки-дисперсний продукт. Інтенсивність масовіддачі визначається числами Пекле й параметричним комплексом – відношення температур. Також розроблено моделі для розрахунку поточної вологості продукту, тривалості процесу, питомих енерговитрат. Розроблено фізичну схему і математичну модель для внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу для системи конденсатор РТС- дисперсний продукт. Базис експериментальних даних задовільно узагальнюються рівняннями (табл. 9) з похибкою у межах 15...20 %. Рівняння використано для розрахунку кінетичних коефіцієнтів процесів тепло- масообміну у визначених граничних умовах.

3. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу сушіння в рекуперативній сушарці, досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнти масовіддачі. Встановлено, що кут нахилу теплопередаючих труб 60° гарантує ефективне перемішування зернового шару, що є пе-

редумовами для максимальних характеристик тепловіддачі до зернового потоку. Підвищення швидкості потоку в 7 разів призводить до росту коефіцієнта масовіддачі в 2,5 рази. Підвищення температури поверхні термосифона на 10°C призводить до росту коефіцієнта масовіддачі на 8 %. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу випарювання в ТМА на базі РТС. Встановлено, що на інтенсивність теплопереносу суттєво впливає частота обертання конденсатора, кут його нахилу та фізичні властивості продукту. З підвищенням в'язкості продукту ефективність апаратів із РТС (у порівнянні із традиційними) зростає. Апарат із РТС забезпечує коефіцієнти теплопередачі, при обробці харчових рідин з в'язкістю від 0,8 до 1,5 Па·с, у діапазоні 500...2600 Вт/м²·К, що в 4 рази вище, ніж у сучасних пластинчастих апаратах. Обґрунтовано методики і створено експериментальні стенди для комплексних досліджень процесу сушіння дисперсних продуктів в ТМА на базі РТС, досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнти масовіддачі. Зростання швидкості обертання РТС в 2 рази призводить до підвищення коефіцієнта масовіддачі на 40%, підвищення температури поверхні термосифону на 10°C призводить до зростання коефіцієнта масовіддачі на 8%.

4. Розроблено інженерну методику розрахунку, проведено обчислювальний експеримент і оптимізацію конструкцій. Оптимізація режимних параметрів апарату з РТС при випарюванні томатної маси обґрунтувала частоту обертання РТС ($n=0,68\text{ с}^{-1}$), при якій цільова функція (загальні енергетичні витрати) має мінімум. Результати експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання показують, що енерговитрати рекуперативної зерносушарки 3,2 МДж/(кг вид. вологи), сушарки з РТС – 3,5 МДж/(кг вид. вологи). Енерговитрати практично на 50% нижче існуючих конвективних сушарок. Аналіз теплових балансів сушарок показує, що ККД сушарки з ТС та РТС 70%. На основі розроблених методик створено програму розрахунку конструктивних параметрів сушарки на базі термосифонів. Розроблено оптимальну функціональну схему сушарки на базі ТС.

5. Показано принципову можливість створення на базі РТС багатофункціональних енергоефективних випарних агрегатів з високим значенням коефіцієнта теплопередачі, надійних в експлуатації, які забезпечують як легкий вихід парової фази, так і відсутність пригару продукту. Впровадження апарату із РТС у лінії виробництва томатної пасти дозволяє знизити енергоємність технології з 3,9 МДж/(кг продукції) до 2,9 МДж/(кг продукції). Розроблено проект рекуперативної зерносушарки продуктивністю 12 т/год. В порівнянні з установкою ДСП-12 питомі енерговитрати знижуються на 30 %, тривалість сушіння скорочується на 10 % при практично однакових габаритних параметрах установки. Термін окупності сушарки становить 3 сезони. Розроблено комплект робочої конструкторської документації на дослідний зразок зерносушарки на базі термосифонів. Впровадження апарату з РТС проведено на відкритому акціонерному товаристві «Концерн Хлібпром» на лініях з термообробки в'язких та дисперсних середовищ. Розроблений проект сушарки з РТС продуктивністю 0,12 кг/с для сушіння вареного гороху на підприємстві ПАТ «Enni Foods». Робота апарату з РТС в якості і сушарок і плющителя дає істотне зниження енерговитрат технологічної лінії— з 4,6 до 1 МДж/(кг продукції). Термін окупності сушарки складає 4 сезони.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Сучасний стан галузей економіки України: проблеми та шляхи вирішення: моногр. / за ред. І.І. Савенко, І.О. Седікової. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 433 с. *(здобувачем у співавторстві написано главу 4).*

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

2. Zykov A.V, Riznichenko D.N., Bezbah I.V. Experimental studies of boiling heat transfer of food solutions // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. Т. 81, вип. 1. С. 85-90. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

3. Безбах И. В., Воскресенская Е.В. Застосування термомеханічних систем в харчових технологіях // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. Т. 80, вип. 1. С. 74-77. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

4. Безбах И.В., Кепин Н.И., Воскресенская Е.В. Повышение энергетической эффективности механических и термомеханических систем пищевых технологий // Probleme energeticii regionale. 2016. № 2 (31). С. 77-83. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

5. Безбах И.В., Омар Саид Ахмед, Донкоглов В.И. Исследование работы термосифонов при обработке дисперсных и вязких пищевых сред // Probleme energeticii regionale. 2009. № 1 (9). С. 73-80. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

6. Bezbah, I.V., Burdo O. G. Rotating heat pipes in devices for heat treatment of the food-stuffs // Applied Thermal Engineering. Vol. 28, Issue 4, March 2008, P. 341–343. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

Статті у фахових виданнях України

7. Zykov A., Bezbah I., Osadchuk P. Modeling of grain drying process by rotation thermosyphon // Аграрний вісник Причорномор'я. 2017. № 85. С. 100-111. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

8. Безбах І.В. Утилізація енергії вологого повітря в рекуперативній зерносушарці // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. Т. 1, вип. 46. С. 197-201. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

9. Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В. Підвищення енергоефективності рекуперативної зерносушарки // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. Т. 2, вип. 45. С. 190-195. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

10. Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В. Дослідження процесу сушіння в рекуперативній зерносушарці // Зернові продукти і комбікорми. 2014. Т. 55, вип. 3. С. 47-50. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

11. Нові конструкції сушарок для виробництва екологічно безпечних зернопродуктів при зменшенні витрат енергії / Бурдо О.Г. та ін. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2012. Т. 1, вип. 41. С. 231–235. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

12. Бурдо О.Г., Безбах И.В., Омар Саид Ахмед. Выпаривание пищевых жидкостей в термомеханическом агрегате на базе вращающегося термосифона // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2010. № 37. С. 85-90. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

13. Дослідження тепло-масообміну під час обробки дисперсних і в'язких харчових продуктів у апаратах на базі термосифонів / Бурдо О.Г. та ін. // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2009. № 22. С. 28-34. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів).*

татів).

14. Бурдо О.Г., Безбах І.В., Донкоглов В.І. Кінетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2009. Т. 1, вип. 36. С. 29-34. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

15. Безбах І.В., Омар Саид Ахмед, Терзиев С.Г. Кінетика процесу випаривання пищевих жидкостей в термомеханическом агрегаті на базі вращающегося термосифона // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2009. Т. 2, вип. 35. С. 191-193. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

16. Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья / Бурдо О.Г. та ін. // Інтегровані технології та енергозбереження. 2008. № 2. С. 23–28. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

17. Развитие конструкций тепло- массообменных аппаратов на базе автономных двух- фазных модулей / Безбах І.В. та ін. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2008. № 32. С. 208-212. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

18. Безбах І.В., Воскресенская Е.В. Моделирование процесса сушки дисперсных пищевых продуктов в аппарате с вращающимся термосифоном // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2008. № 34 (2). С. 29-34. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

19. Сушити горох за економними технологіями / Бурдо О.Г. та ін. // Зерно і хліб. 2007. № 2. С. 46-47. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

20. Безбах І. В., Донкоглов В. І. Развитие тепломассообменной аппаратуры на основе вращающихся термосифонов // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2007. Т.1, вип. 30. С. 213-217. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

21. Нові підходи до сушіння дисперсних харчових матеріалів / Бурдо О.Г. та ін. // Аграрний вісник Причорномор'я. Сер. Економічні науки. Одеса, 2007. Вип. 37. С. 40. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

22. Безбах І.В., Бахмутян Н. В. Исследование процесса сушки плодов и ягод во взвешенном слое // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2006. Т. 2, вип. 28. С. 112-116. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

23. Безбах І.В., Бурдо О.Г., Савкін М.В. Інтесифікація термообробки харчових рідин // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2004. № 27. С. 196-200. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

Статті в інших виданнях

24. Безбах І.В. Исследование работы рекуперативных сушилок на базе термосифонов // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. Т. 2, вип. 47. С. 181-186. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

25. Безбах І.В. Оптимизация работы выпарного аппарата на базе вращающегося термосифона // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. Т. 1, вип. 47. С. 113-116. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*.

Патенти

26. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів: пат. на корисну модель 97592 Україна: МПК F26B 17/10 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u201410150; заявл. 15.09.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6.

27. Пристрій для нагрівання дисперсних матеріалів: пат. на корисну модель 97593 Україна: МПК F26B 17/10 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Кондратенко О.А., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u201410151; заявл. 15.09.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6.

28. Пристрій для нагрівання харчових рідин: пат. на корисну модель 107734 Україна:

МПК F24H 9/00 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u2015 11447; заявл. 20.11.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

29. Пристрій для сушіння харчових дисперсних продуктів: пат. на корисну модель 107735 Україна: МПК F26B 3/00, F26B 17/00 / Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О.В.; власник ОНАХТ. № u2015 11448; заявл. 20.11.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

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

Матеріали конференцій

31. Безбах І.В., Кепин Н.И. Использование инновационного энергоэффективного оборудования для тепловой и механической обработки плодового сырья // Інноваційні енерготехнології: матеріали VI Міжнар. наук-практ. конф., Одеса, 4-8 вересня 2017 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. С. 279-285. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

32. Безбах І.В., Зиков А.В., Воскресенская Е.В. Моделирование процесса сушки дисперсных материалов в аппарате с вращающимся термосифоном // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского (МНТК Плановский - 2016), Москва, 8-9 сентября 2016 г. / Москва, 2016. Т 2. С. 94-97 *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

33. Безбах І.В. Анализ эффективности рекуперативных сушилок на базе термосифонов // Інноваційні енерготехнології: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 7-11 вересня 2015 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. С. 341-345. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

34. Бурдо О.Г., Безбах І.В., Зиков О. В. Підвищення енергоефективності рекуперативної зерносушарки // Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: матеріали XV Міжнар. наук. конф., Одеса, 8-12 вересня 2014 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. С. 356-361. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

35. Бурдо О.Г, Безбах І.В., Зыков А.В. Новые конструкции сушилок для производства экологически безопасных зернопродуктов при уменьшении удельных затрат энергии // Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудов (секционные доклады) междунар. науч.-техн. конф., Иваново (Россия), 23-26 сентября 2014 г. / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2014. С. 339-343. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

36. Бурдо О.Г, Безбах І.В., Зыков А.В. Моделирование процесса сушки в блочной зерносушилке // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011: материалы Третьей междунар. науч.-практ. конф., Москва, 20-23 сентября 2011 г. / Москва, 2011. Т 1. С. 224-228. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

37. Тепло- массообменная аппаратура на базе двухфазных модулей / Безбах І.В. та ін. // XII ПАМК: материалы междунар. науч. конф., Одеса, 8 – 12 сентября 2008 г. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одесса, 2008. С. 301 – 305. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів)*

АНОТАЦІЯ

Безбах І. В. Науково-технічні основи створення рекуперативних сушарок і термомеханічних агрегатів для обробки в'язких і дисперсних харчових продуктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацев-

тичних виробництв. Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена розробці науково-технічних основ для розробки нового класу обладнання: рекуперативних сушарок і термомеханічних агрегатів для обробки в'язких і дисперсних харчових продуктів. На першому етапі методами енергетичного менеджменту встановлено, що технології ключових операцій виробництва харчових продуктів – концентрування, термообробка, сушіння відрізняються високою енергоємністю. В результаті аналізу сучасних принципів енергопідводу обґрунтовано, що застосування теплових труб, термосифонів, ротаційних термосифонів дозволить отримати наступні переваги: скорочення ланцюга трансформації енергії; сполучення в апараті декількох технологічних процесів; інтенсифікація тепло- масообміну; адресна доставка енергії до продукту; збільшення надійності конструкції апарата; рекуперация теплоти. Проаналізовано стан техніки для випарювання, термообробки харчових неньютонівських рідин, виявлені переваги й недоліки традиційних випарних апаратів. Розроблено класифікацію термомеханічних агрегатів. Розглянуто шляхи інтенсифікації процесів теплопереносу у випарних апаратах. Проаналізовано стан техніки для сушіння зерна, енерговитрати і якість зерна при сушінні. Розглянуто принципи підвищення енергетичної ефективності технологій сушіння, переваги й недоліки існуючих конвективних сушарок. Приведено схеми рекуперативних зерносушарок. Розроблено класифікацію апаратів для сушіння й теплової обробки дисперсних харчових продуктів. Сформульована загальна наукова проблема, робочі гіпотези, мета, завдання і етапи аналітичних і експериментальних досліджень. Специфічність поставлених задач потребує доповнення існуючого аналітичного опису процесів: внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу в системі конденсатор ротаційного термосифону-продукт при випарюванні харчових неньютонівських рідин; в системі конденсатор рекуперативної сушарки-дисперсний продукт; для внутрішньої і зовнішньої задачі теплопереносу в системі конденсатор ротаційного термосифону-дисперсний продукт. Об'єктами досліджень є як весь технологічний ланцюжок виробництва й енергоємне встаткування, так і продукти які обробляються. Розглянуто характеристики неньютонівських харчових рідин, дисперсних продуктів як об'єктів дослідження, наведено їх класифікацію. Для досягнення поставленої мети обґрунтовано методика, створено експериментальні стенди для комплексних досліджень, проведено експериментальні дослідження та визначено вплив режимних параметрів на кінетику процесу: сушіння дисперсних продуктів в рекуперативній сушарці; випарювання неньютонівських рідин в термомеханічних агрегатах на базі ротаційних термосифонів; сушіння дисперсних продуктів в термомеханічних агрегатах на базі ротаційних термосифонів. Використано наступні 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. Для термообробки, концентрування неньютонівських харчових рідин розроблено установку, в якій енергія згорання палива передається до продукту за допомогою ротаційного термосифону. Для сипких продуктів розробле-

но рекуперативну сушарку, в якій енергія згоряння палива передається до продукту за допомогою двофазного випарниково-конденсаційного контуру. Це дозволяє максимально повно використовувати енергію палива при забезпеченні екологічної безпеки продукту. Для сипких продуктів розроблено сушарку, в якій енергія згоряння палива передається до продукту за допомогою ротаційного термосифону. Досліджено кінетику процесу сушіння дисперсних продуктів у сушарці на базі ротаційного термосифону: визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора ротаційного термосифону до продукту; отримано термограми при сушінні; криві сушіння; залежність питомих енерговитрат на сушіння від температури поверхні конденсатора у сушарці на базі ротаційного термосифону. Проведено експерименти на стенді «Рекуперативна сушарка», на який було додатково встановлено теплообмінник для конденсації пари вологого повітря. Проведено узагальнення отриманих експериментальних даних та розроблено методики для розрахунку та оптимізації розроблених апаратів. Алгоритми розрахунку розроблених апаратів на представлені як сукупність окремих блоків. Розроблені моделі реалізовані на ЕОМ. Розроблені програми розрахунків можуть бути використані як для поглиблення аналізу внутрішнього механізму сушіння, випарювання так для розрахунку параметрів інноваційних сушарок, апаратів для термообробки. Проведено оцінку енергетичної ефективності застосування схеми із ротаційним термосифоном у лінії з виробництва томатної пасти. Впровадження апарату з РТС проведено на відкритому акціонерному товаристві «Концерн Хлібпром» на лініях з термообробки в'язких та дисперсних середовищ.

Розраховано економічну ефективність впровадження нової системи зерносушіння. Вихідними даними для розрахунків є режимні характеристики, компоновочні параметри рекуперативної зерносушарки. Розрахунок проведено для ДП "Гайсинський комбінат хлібопродуктів" ВАТ «Концерн Хлібпром».

Розроблено конструкцію сушарки на базі термосифонів. Наведено опис конструктивних рішень зерносушарки на базі термосифонів, продуктивністю 6 т/год, з термосифонним шаровим підігрівачем зерна й теплогенератором, що забезпечує екологічно безпечну технологію сушіння. Виготовлено основні вузли дослідного зразку сушарки на базі ТС.

Прийняті робочі гіпотези підтверджуються результатами виробничих випробувань розробленої інноваційної техніки, яка використовує ефект адресної доставки енергії.

Ключові слова: термосифони, моделювання, випарювання, сушіння

ABSTRACT

Bezbakh I.V. The scientific and technical bases of creating recuperative dryers and thermomechanical aggregates for processing of viscous and dispersed food products. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

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

In the dissertation work the task of creation of innovative energy-efficient equipment for processing viscous and disperse products, development of methods of calculation and optimization of such equipment is solved and solved. The methods of energy management conducted system research and installed energy-intensive objects of food technology. The solution of tasks in the work was carried out according to the general scheme: "Physical and mathematical model - experiment - integration and engineering method - creation of an experimental sample". As a result of the complex of analytical, experimental and industrial studies, designs have been developed, the influence of constructive and regime parameters on the kinetics of the process in innovative devices has been determined: driers based on the rotation thermosyphons; evaporating apparatus on the basis of rotation thermosyphons; recuperative dryers based on thermosyphons. In the paper, the representation of the structure of the equations in the generalized variables for calculation for the calculation of: the process of heat transfer during the evaporation of food non Newton liquid ; the degree of mixing of the grain layer, the coefficients of mass return, the duration of the drying process of wheat, the specific energy consumption for drying in the recuperative grain dryer; coefficients of mass transfer in a dryer based on rotation thermosyphons. The scientific bases are grounded, engineering methodology, computer program for calculation, computer modelling and optimization are carried out: a racing machine on the basis of rotation thermosyphons; recuperative dryer based on thermosyphons; driers based on rotation thermosyphons. The functional scheme of the dryer on the basis of the thermosyphons, design documentation (drawing) for the production of individual units of grain drying: a spray-dryer, a drying chamber, a thermosyphon heater, was developed. The economic efficiency of using the developed innovative models of technology and technologies at the enterprises of the branch is proved.

Keywords: thermosyphon, modelling, evaporation, drying.

АННОТАЦИЯ

Безбах И.В. Научно-технические основы создания рекуперативных сушилок и термомеханических агрегатов для обработки вязких и дисперсных пищевых продуктов. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

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

В диссертационной работе поставлена и решается задача создания инновационного энергоэффективного оборудования для обработки вязких и дисперсных продуктов, разработки методов расчета и оптимизации такого оборудования. Методами энергетического менеджмента проведены системные исследования и установлены энергоемкие объекты пищевых технологий. Решение задач в работе проводилось по общей схеме: «физическая и математическая модель - эксперимент - обобщение и инженерная методика - создание экспериментального образца». В результате комплекса аналитических, экспериментальных и производственных исследований разработаны конструкции, определено влияние конструктивных и режимных параметров на кинетику процесса в инновационных аппаратах: сушилке на базе вращающегося термосифона; выпарном аппарате на базе вращающегося термосифона; рекупе-

ративной зерносушилке на базе термосифонов. В работе расширены представления и методом «анализа размерностей» получены структуры уравнений в обобщенных переменных для расчета: процесса теплопереноса при выпаривании пищевых неньютоновских жидкостей; степени смешивания зернового слоя, коэффициентов массоотдачи, продолжительности процесса сушки пшеницы, удельных энергозатрат на сушку в рекуперативной зерносушилке; коэффициентов массоотдачи в сушилке на базе вращающегося термосифона. Обоснованы научные основы, разработаны инженерные методики, компьютерные программы для расчета, проведено компьютерное моделирование и оптимизация: выпарного аппарата на базе вращающегося термосифона; рекуперативной сушилки на базе термосифонов; сушилки на базе вращающегося термосифона. Разработана функциональная схема сушилки на базе термосифонов, конструкторская документация (чертежи) на изготовление отдельных узлов зерносушилки: слоевого подогревателя, сушильной камеры, термосифонного калорифера. Доказана экономическая эффективность использования разработанных инновационных образцов техники и технологий на предприятиях отрасли.

Ключевые слова: термосифоны, моделирование, выпаривание, сушка.

Підписано до друку 5.11.2018 р. Формат 60×84/16
Папір офсетний. Друк різнографічний
Умов. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. 123