МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БАНДУРА ВАЛЕНТИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 658.261/.262:665.1(043.3)

НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ОЛІЙНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІНТЕНСИФІКАТОРІВ

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

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана у Вінницькому торговельно-економічному інституті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бурдо Олег Григорович,
Одеська національна академія харчових технологій, завідувач кафедри процесів, апаратів та енергетичного менеджменту

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор,
Зав'ялов Володимир Леонідович,
Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, кафедра процесів і апаратів харчових виробництв, професор кафедри;

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

– доктор технічних наук, професор
Дячок Василь Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, кафедра прикладної екології та збалансованого природокористування, професор кафедри;

Захист відбудеться **22 квітня 2021 р. о 10$^{\underline{00}}$ годині** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112, ауд. А-234.

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

Автореферат розісланий *19 квітня 2021 року.*

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доцент Т.І. Нікітчіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Олійно-жирова галузь відіграє одну з ключових ролей в України та є однією з провідних та мобільних в агропромисловому комплексі країни. Це, мабуть, єдина галузь, яка навіть в умовах світової фінансової кризи демонструє постійне зростання. На даний час Україна займає одну з провідних позицій у світі за об'ємами виробництва і переробки олііта жирів. Модернізація обладнання, використання сучасних ресурсоефективних технологій, широкий асортимент продукції, високий рівень конкурентоспроможності, значна інвестиційна привабливість та експортна орієнтація галузі – риси, які характеризують внесок у вітчизняну економіку.

Тому в роботі пропонуються науково обґрунтовані енергоефективні розробки конкуренто - спроможної промислової апаратури й технологічних ліній з урахуванням їх складної взаємодії між собою та з навколишнім середовищем із застосуванням методів системного аналізу, математичного та фізичного моделювання. Як інструмент удосконалення енерготехнологій переробки олійної сировини використовувались принципи адресної доставки енергії. Саме на них базувались науково-технічні ідеї та гіпотези.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Державної програми «Енергетична стратегія України на період до 2030р.»; Державної цільової програми «Розвиток українського села до 2015р.», в рамках науково-технічної програми «Розвиток енергетики та енергозбереження в харчовій промисловості України до 2010р.» (проекти 2.10; 2.17), в рамках держбюджетної тематики науково-дослідної роботи (0116U004840 «Розроблення промислових моделей та обґрунтування робочих режимів тепломасообмінного обладнання з вібраційним інтенсифікатором процесів сушіння та екстрагування») до тематичного плану НДДКР Вінницького торговельно-економічного інституту КНТЕУ на 2021 – 2024 рр. за напрямом «Обґрунтування процесу сушіння насіння соняшнику інфрачервоним опроміненням в псевдозрідженому шарі» (реєстраційний номер 0121U100367), а також за договором про творчу співпрацю з ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування й розробка ресурсоефективних технологій виробництва рослинних олій і створення конкурентоспроможної промислової апаратури, впровадження, якої примножить значний вклад в розвиток економіки країни.

Для досягнення даної мети були поставлені наступні завдання:

– на основі енергетичного аудиту провести системний аналіз технології виробництва рослинної олії. Визначити та обґрунтувати напрями удосконалення апаратурно-технологічних рішень з переробки сировини.

– проаналізувати методи інтенсифікації процесу екстрагування та розробити математичні моделі,методики досліджень та експериментальний стенд для вивчення кінетики процесу під впливом мікрохвильового поля;

– експериментально визначити основні тепломасообмінні характеристики екстрагування в умовах мікрохвильового підведення енергії;

– визначити тенденції розвитку техніки сушіння олієвмісної сировини, обґрунтувати технологічно-конструктивну схему на основі механічних та електромагнітних інтенсифікаторів;

– розробити математичні моделі сушіння олієвмісної сировини в умовах електромагнітного поля та експериментально визначити основні тепломасообмінні характеристики сушіння для нерухомого, рухомого та віброзваженого шару сировини;

– узагальнити експериментальні дані та розробити інженерні методи розрахунку екстрактора та сушарки з електромагнітними інтенсифікаторами;

– розробити дослідно-промислові зразки інноваційного обладнання для сушіння та екстрагування, провести їх виробниче випробування;

– встановити показники якості отриманих зразків продуктів, дати економічну оцінку розробленого обладнання та технології.

Об'єкт дослідження – процеси сушіння олієвмісної сировини під дією вібраційного,інфрачервоного та мікрохвильового поля при періодичному та безперервному режимах обробки, а також процес екстрагування олії із насіння сої та ріпаку з мікрохвильовою технологічною дією на продукт.

Предмет дослідження – закономірності процесів, режими реалізації та їх вплив на показники призначення устаткування, а саме вібраційні сушарки періодичної та безперервної дії з інфрачервоним та мікрохвильовим підведенням енергії; закономірності кінетики процесу бародифузії та параметри екстрактора з мікрохвильовим інтенсифікатором.

Методи досліджень: аналітичні, теоретичні, експериментальні, зокрема:

– метод енергетичного аудиту, системного аналізу та структурного моделювання для виявлення існуючихпротирічв технології та техніці олійного виробництва та встановлення методів їх розв'язання;

– метод математичного моделювання за феноменологічними принципами процесів тепломасоперенесення при сушінні та екстрагуванні, які враховують фазові перетворення і відповідну зміну маси;

– метод аналізу розмірностей для знаходження структури критеріального рівняння з метою визначення коефіцієнту масовіддачі в процесі сушіння та екстрагування; метод найменших квадратів для знаходження коефіцієнтів критеріального рівняння;

– метод теплофізичного моделювання та фізичних методів аналізу структури розчинів;

– методи математичної статистики для оцінки похибок вимірювань та забезпечення надійності результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі сформульовано наукове положення: «Інтенсифікація процесів масопереносу при зневодненні та екстрагуванні може забезпечуватися шляхом зниження внутрішнього дифузійного опору завдяки організації специфічного бародифузійного потоку із капілярно-пористої структури рослинної сировини за допомогою спрямованої енергетичної дії електромагнітного поля».

В роботі вперше:

– розроблено спосіб комбінованого сушіння сої, соняшника та ріпаку в апараті з використанням ІЧ- та НВЧ енергопідводу;

– дано математичний опис кінетики сушіння, що визначає вологовміст, температуру зерна та температуру повітря в сушарках періодичної та безперервної дії з підведенням механічних та електромагнітних інтенсифікаторів;

– встановлено кінетичні залежності процесу сушіння олійної сировини у стрічковій сушарці у полі НВЧ в комбінації з ІЧ полем;

– отримано залежність питомих енерговитрат на процес сушіння;

– розроблено методи експериментального моделювання для визначення коефіцієнтів дифузії та масовіддачі в процесі екстрагування олії із насіння ріпаку та сої, отримано залежності впливу потужності мікрохвильового поля, температури, подрібнення сировини, гідромодулю, типу розчинника, часу на зміну концентрації олії із насіння сої та ріпаку;

Дістало подальший розвиток:

– математичне моделювання процесу інфрачервоного сушіння в умовах рухомого шару сировини при використаннічисел подібності;

– дослідження методом «аналізу розмірностей» для отримання рівняння в узагальнених перемінних для розрахунку комбінованих процесів екстрагування в умовах об’ємного мікрохвильового підведення енергії в режимах екстрагування сировини, в системі «жмих-етанол, гексан».

Практичне значення одержаних результатів. Створено клас вібраційних сушарок з дією механічних та електромагнітних інтенсифікаторів, що дозволило за необхідної якості обробки та продуктивності обладнання значно зменшити енерговитрати в порівнянні з традиційними конвеєрними машинами.

Розроблено методики експериментальних досліджень для визначення кінетичних коефіцієнтів за різних режимних параметрів, які можна використовувати досліджуючи процеси екстрагування.

Розроблено технологічну схему екстракційного вилучення олії із насіння ріпаку та сої за допомогою мікрохвильового інтенсифікатора. Встановлено ефективність використання в мікрохвильовому полі полярного, більш безпечного, нетоксичного етилового спирту на противагу неполярному, токсичному, вибухонебезпечному гексану.

Розроблена технічна документація, виготовлена та впроваджена у виробництво експериментально-промислова модель вібраційної інфрачервоної сушарки на ТОВ-Підприємство «АВІС» м. Вінниця (акт впровадження від 18 лютого 2014р.), на ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат» (акт впровадження від 22 травня 2015р.), в ТОВ «Україна+» (акт впровадження від 10 липня 2018р.). Розроблені технології, екстрактор з мікрохвильовим інтенсифікатором та зразки олій пройшли успішну апробацію в умовах ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат» (акт впровадження від 8 жовтня 2012р.).

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Вінницького національного аграрного університету у вигляді монографії, 2 навчальних посібників та методичних вказівок до виконання лабораторно-практичних занять для підготовки фахівців.

Особистий внесок здобувача. Разом з науковим консультантом (д.т.н. Бурдо О.Г.) сформульовані наукові положення і концепції наукових досліджень. Автор безпосередньо здійснювала наукове керівництво здобувачем наукового ступеня кандидата технічних наук Зозуляком І.А. в напрямку вібраційних технологій сушіння насіння соняшнику, аспірантом Паламарчуком В.І. в напрямку ІЧ-сушіння олієвмісної сировини в нерухомому, рухомому та вібраційному полі, аспірантом Коляновською Л.М. в напрямку дослідження процесу екстрагування олієвмісної сировини в мікрохвильовому полі. Планувала експеримент, здійснювала аналіз експериментальних даних, узагальнювала отримані результати. Брала участь в постановці досліджень в обговоренні результатів аналітичного та експериментального моделювання, які проводили аспіранти Бережнюк Д.П та Попяк О.Г. Приймала участь в проєктуванні нових зразків техніки (вібраційних конвеєрів з ІЧ та МХВ - опроміненням сировини та МХВ екстрактора). Займалась впровадженням інноваційних зразків техніки на агропромислових підприємствах України.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): III, IV, V, VI МНТК «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, ОНАХТ 2011, 2013, 2015, 2016), I, II, IV, V, VI МНТК «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави» (Вінниця: ВНАУ 2010, 2011, 2014, 2016), МНТК «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 50-тиріччю ТНТУ та 165-тиріччю з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 2010), на VIII Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources» (Minsk, Belarus, 2011); XIII МНТК «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Вінниця, ВНАУ 2012), МНТК «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Київ, НУХТ 2012), XIV МНТК «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, ОНАХТ 2012), XII МНТК «Хлібопродукти-2012» (Одеса, ОНАХТ 2012), Науково-практичній конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» (Одеса: ОНАХТ 2012, 2014, 2020); на Мінському міжнародному Форумі по тепломасообміну (Мінськ, Беларусь 2012); IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Новітні тенденції у харчових технологіях та якість і безпечність продуктів». (Львів, 2012); МНТК «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах» (Вінниця, 2013), МНТ Інтернет-конференції «Сучасні напрямки теоретичних та прикладних досліджень 2013», XIII МНТК «Інтегровані технології та енергозбереження» (Харків, 2013), Всеукраїнській науковій конференції молодих вчених (Умань, 2012), 73 та 76 наукових конференціях науково-викладацького та наукового складу ОНАХТ (Одеса: 2013, 2016), МНТК «Сучасні агротехнології: тенденції та

інновації» (Вінниця, 2015), МНК «2016: Зернобобові культури та соя для сталого розвитку аграрного виробництва України» (Вінниця, 2016р.), XV Мінському міжнародному форумі по тепло- і масообміну (2016р., Мінськ, Беларусь), 16th International Scientific Conference Engineering forrural development. Proceedings, (2017, Jelgava, Latvia).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 95 наукових працях, зокрема: 1 монографії, в 51 фаховому виданні України; 12 у виданнях, які входять до наукометричної бази даних SCOPUS та Web of Science; 2 патентах України на винаходи та 5 патентах на корисну модель; 24 публікаціях матеріалів конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, десяти розділів, висновків, додатків (на 202 стор.). Робота містить 305 сторінок тексту, включаючи 165 рисунків, 46 таблиць, список використаної літератури – 352 джерела.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету досліджень, показано перспективність і наукову новизну та практичну цінність роботи.

У першому розділі «Сучасний рівень та проблеми переробки олійних культур» наведено розвиток ринку олійних культур як сировини для виробництва олії,специфіку сушіння та екстрагування насіння соняшника, сої та ріпаку. Проаналізовано устаткування для сушіння та екстрагування, а також методи інтенсифікації відповідних процесів. Подано аналіз наукових основ масопереносу при сушінні та екстрагуванні олійних культур, які ґрунтуються на фундаментальних роботах Аксельруда Г.А., Бєлобородова В.В., Гинзбурга А.С., Гончаренко Г.К., Гребенюка С.М., Ключкіна В.В., Ликова А.В., Лисянського В.М., Рудобашти С.П. та інших. Розглянуто досягнення з проблем сушіння та екстрагування у відомих наукових школах України: Національного університету харчових технологій (Малежик І.Ф., Зав'ялов В.Л., Штефан Є.В.), Одеської національної академії харчових технологій (Бурдо О.Г., Калінін Л.Г., Станкевич Г.М.), «Львівської політехніки» (Атаманюк В.М., Гумницький Я.М., Дячок В.В. Семенишин Є.М.), Донецького національного університету економіки та торгівлі (Поперечний А.М.), Харківського державного університету харчування і торгівлі (Потапов В.О.), Інституту технічної теплофізики (Снєжкін Ю.Ф.), Національного університету біоресурсів та природокористування України (Котов Б.І.). Показано перспективи інтенсифікації процесу сушіння на основі ІЧ-випромінювачів. Розглянуто питання перспективності, розвитку, проблем впровадження, переваг та недоліків, а також приклади використання мікрохвильових технологій у харчових виробництвах. Обґрунтовано принципову схему та завдання досліджень.

У другому розділі «Характеристика об'єктів, методології й методики досліджень» проведено аналіз фізико-механічних і теплофізичних властивостей олієвмісної сировини, описано методику визначення фізико-механічних і теплофізичних параметрів процесу сушіння, методику експериментальних досліджень у вібраційній сушарці з U- подібним контейнером.

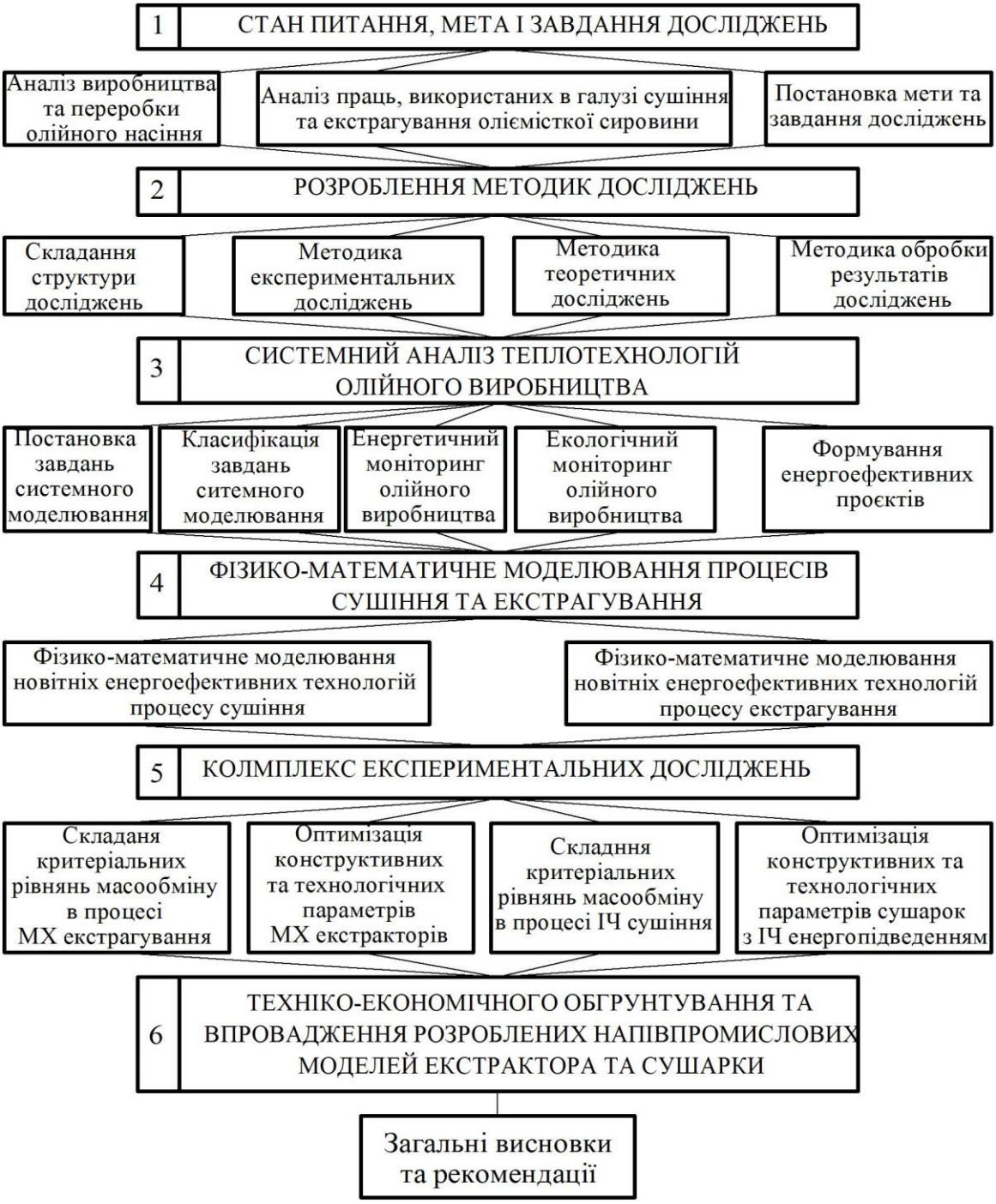


Рис. 1. Програма досліджень

Описано методику експериментального дослідження інфрачервоного сушіння олійних культур, яка передбачає експериментальні дослідження кінетики тепломасообміну для даного процесу у нерухомому, рухомому та віброзваженому шарі продукції. Описано методику експериментальних досліджень екстрагування олієвмісної сировини у мікрохвильовому полі. Розроблено етапи досліджень енергоефективних процесів сушіння та екстрагування (рис.1). Розглянуто методику узагальнення результатів експериментів, зроблено оцінки похибок вимірів.

У третьому розділі «Системний аналіз теплотехнологій олійного виробництва» викладено результати дослідження відповідно розвитку енергетичних і екологічних протиріч у суспільстві. Аналіз складної системи виробництва рослинної олії проводився на 4 ієрархічних рівнях

(підприємство – технологічні цехи – лінії - обладнання). Першим етапом моніторингу був енергетичний аудит підприємства в цілому. Ключовим параметром, за яким проводився аудит, були питомі витрати енергії на одиницю продукції (j, Дж/кг), які визначались як середні за місяць, так і в залежності від продуктивності підприємства (рис.2).

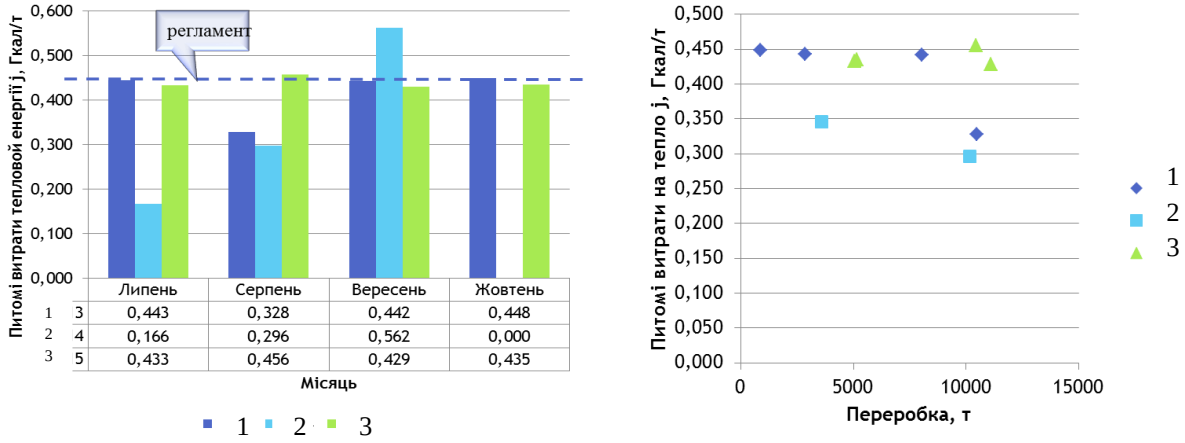


Рис.2. Результати енергетичного аудиту.

На рис. 2 цифрою 3 позначено останній рік, 2 – передостанній, а 1 – два роки тому. Проведено електротехнічний та теплотехнічний аудит на всіх 4 рівнях підприємства. В результаті обґрунтовано проекти підвищення енергетичної ефективності олійного виробництва. Суттєві резерви зниження витрат енергетичних ресурсів мають організаційно-технічні (ОТ) проекти (рис.3). Вони вважаються проектами першого пріоритету. Другим етапом удосконалення теплотехнологій вважаються апробовані проекти з утилізації теплових викидів та посилення теплової ізоляції. Третім етапом модернізації теплотехнологій є розробка та впровадження інноваційних проектів у технологіях сушіння, екстрагування та розділення місцели.

Організаційно-технічні проекти мають резерви в узгоджені потужності котельні (К) із роботою технологічних цехів виробництва олії. Особливі перспективи можна очікувати від впровадження сучасних принципів ефективного підведення енергії, використання електромагнітних генераторів (ЕМГ). Генератори мікрохвильового діапазону (МХ) мають стати базою для створення принципово нових апаратів для екстрагування олії (ЕО).

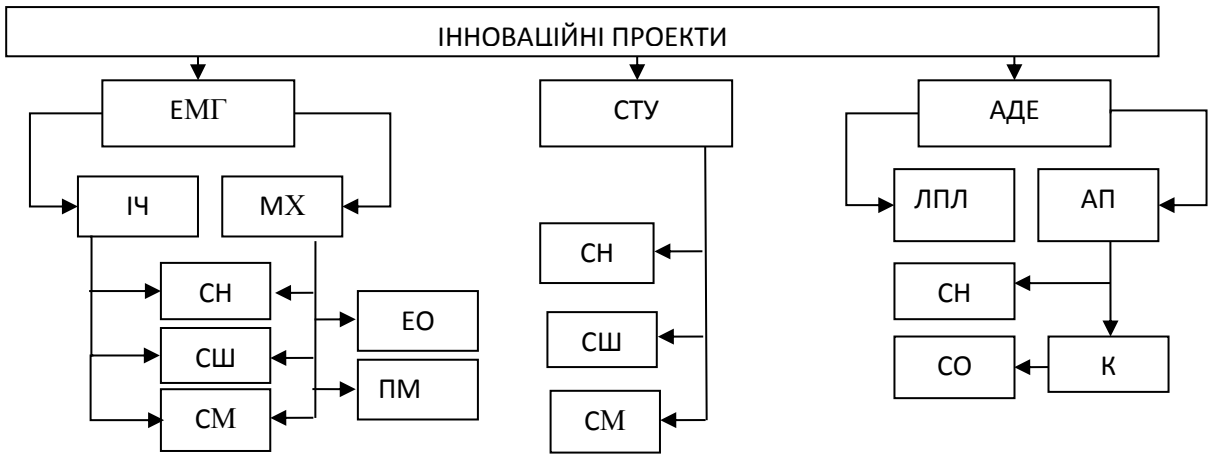


Рис.3. Класифікація інноваційних проектів.

Вирішувати завдання забезпечення підприємства енергетичними ресурсами можливо шляхом альтернативних джерел енергії (АДЕ), паливних пелет (АП) із лушпиння соняшника. В результаті підприємство повністю замінить природний газ при опаленні (СО) та в технології (рис. 3).

Аналіз та узагальнення технологічних етапів складної багаторівневої системи отримання олії, що визначають функціонально-структурну схему переробки олійного насіння, кількість технологічних операцій, специфіку взаємодії зовнішніх і внутрішніх, прямих і зворотних, основних і допоміжних зв'язків, дозволили уточнити загальну внутрішню організацію всього підприємства з точки зору поставлених нами завдань.

У **четвертому розділі**: «Механікодифузійна модель комбінованих процесів тепломасоперенесення при екстрагуванні» розглянуто підходи до математичного опису процесів екстрагування в МХП.

Виходячи з теоретичних посилань адресної доставки енергії й теорії «бародифузії» професора О.Г.Бурдо, прийнята робоча гіпотеза про одночасне переміщення цільового компонента речовини, що екстрагується у вигляді молекулярної дифузії рідкої фази, молярного масопереносу пари й бародифузійного видалення рідкої фази точковими джерелами.

Оскільки маса речовини, що екстрагується може змінюватись за рахунок перенесення речовини шляхом дифузії dU_D, фазового перетворення dU_f і у крапельній фазі під тиском пари (точкові джерела перегрітої пари) dU_p то справедлива буде наступна рівність:

$$dU = dU_D + dU_f + dU_p\,, \tag{1}$$

Використовуючи критерій фазового перетворення $\varepsilon=\frac{dU_f}{dU}$ і вводячи критерій термомеханічного видалення рідкої фази (під дією надлишкового тиску пари, інеційованого збільшенням температури тіла і перегрівом пари) $\varepsilon' = \frac{dU_p}{dU}$, можна визначити локальну швидкість зміни речовини, що екстрагується) в капілярно-пористому тілі за рівнянням:

$$\rho_0 \frac{dU}{d\tau} = \rho_0 \varepsilon \frac{dU}{d\tau} + \rho_0 \varepsilon \frac{\partial U_f}{\partial \tau} + \rho_0 \frac{\partial U_D}{\partial \tau}, \tag{2}$$

де $U=c/\rho_0$, U, c, ρ – вологовміст, об’ємна концентрація і густина сухого «скелета» вологого тіла.

Якщо$\varepsilon' = const$, то рівняння (2) можна подати у вигляді:

$$\rho_0 \frac{dU}{d\tau} = \frac{1}{1-\varepsilon'} d_{iV}\left(-D_m \nabla U\right) + \varepsilon \rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau}, \tag{3}$$

або для поля концентрації у формі Фіка-Фурьє:

$$\rho_0 \frac{\partial c}{\partial \tau} = D_{ef} \nabla^2 c + I_n \quad , \tag{4}$$

де $-D_{ef} = \frac{\mathrm{D}}{1-\varepsilon'}$ феноменологічний коефіцієнт ефективної дифузії, (м/с^2);

I_n– об’ємне джерело пароутворення, інтенсивність якого залежить від підведеної енергії МХП $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3\text{с}}\right)$,

$$I_n = \varepsilon \cdot \rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{\partial c}{\partial \tau},$$

де $\varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}$ – ефективна швидкість пароутворення.

Швидкість пароутворення можна визначити з рівняння теплового балансу для частинки масою m, яка нагрівається «в контакті» з екстрагентом електромагнітним полем» потужністю P_m. Теплота виділена в об'ємі частинки рослинного матеріалу витрачається на нагрівання капілярно-пористого тіла, випаровування рідкої фази й передається конвекцією в об'єм екстрагента:

$$P_m = m_m c_m \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \varepsilon m_0 r \frac{\partial u}{\partial \tau} + \alpha f \left(\theta - t_p\right). \tag{5}$$

Аналогічне рівняння запишемо для об'єму екстрагента:

$$P_p = V_p \rho_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} - \alpha f \left(\theta - t_p\right). \tag{6}$$

Складаючи рівняння (5) і (6) матимемо:

$$P_m + P_p = m_m c_m \frac{d\theta}{d\tau} - m_0 r \frac{du}{d\tau} + m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = N\eta, \tag{7}$$

де N, P_m, P_p – потужність магнетрона, тепловиділень в матеріалі і розчині, що екстрагується; η – ККД – установки електромагнітного випромінювання; m_m, m_p – маса матеріалу і розчину; m_0 – маса сухої частини матеріалу; V_p, ρ_p – об'єм і густина екстрагента; α, f – коефіцієнт і поверхня теплообміну між фазами; t_p – температура розчинника.

В рівнянні (7) складова $m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = P_p'$ чисельно дорівнює потужності тепловиділень у об'ємі (масі) екстрагента при нехтуванні втратами теплоти в навколишнє середовище.

Використовуючи заміну швидкості нагріву тіла (похідну температуриза часом) очевидним співвідношенням:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{r}{c_m} Rb \frac{du}{d\tau}, \tag{8}$$

після перетворень отримаємо:

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{Nr - P_p'}{\left(m_m Rb + \varepsilon m_0\right) r}. \tag{9}$$

Підставляючи значення (5) в рівняння (10), матимемо:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_{ef} \nabla^2 c + \frac{\left(Nr - P_p'\right) \varepsilon \rho}{\left(m_m Rb + \varepsilon m_0\right) r}. \tag{10}$$

Таким чином, процес дифузії речовини, що екстрагується в капілярно пористому тілі під дією мікрохвильового поля описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_{ef} \nabla^2 c + q_m. \tag{11}$$

За своєю структурою рівняння (11) аналогічне рівнянню теплопровідності тіла з внутрішнім джерелом теплоти, розв'язок якого відомий.

Задаючи початкові й граничні умови III роду для тіла у формі необмеженої пластини завдовжки $2R$ запишемо (при $\tau = 0$; $\frac{\partial c}{\partial x} = 0$; $c = c_0$; $x = R$; $-R < x < +R$):

$$\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial \tau} = D_{ef}\frac{\partial^2 c(x,\tau)}{\partial x^2} + q_m; -D_{ef}\left(\frac{\partial c(R,\tau)}{\partial x}\right)_n + \beta(c_p - c) = 0. \quad (12)$$

Розв'язок системи (12) при $q_m^v = const$ отримаємо у вигляді:

$$\frac{c(x,\tau) - c_p}{c_0 - c_p} = \frac{Po'}{2}\left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{Bi_m}\right) - \sum_{n=1}^{\infty}\left(1 + \frac{Po'}{\mu_n^2}\right)A_n \cos\mu_n \frac{x}{R} e^{-\mu_n^2 Fo_m}, \quad (13)$$

де $Po' = \frac{q_m R^2}{D_{ef}(c_p - c_0)}$ – число Померанцева, масообмінне; $Fo_m = \frac{D_{ef}}{R^2}\tau$ – число Фурьє; $Bi_m = \frac{\beta R}{D_{ef}}$ – число Біо масообмінне.

Для середнього значення концентрації речовини, що екстрагується:

$$c(\tau) = \frac{1}{R}\int_o^R c(x,\tau)dx,$$

кінетична залежність визначається рівнянням:

$$\frac{\bar{c}(\tau) - c_p}{c_0 - c_p} = \frac{Po'}{3}\left(1 + \frac{3}{Bi_m}\right) - \sum_{n=1}^{\infty}\left(1 + \frac{Po'}{\mu_n^2}\right)B_n e^{-\mu_n^2 Fo_m}. \quad (14)$$

Для визначення (в першому наближені) кількісного значення внутрішнього джерела видалення рідкої фази під дією мікрохвильового поля $q_m(N)$ за даними експерименту використаємо рівняння (14). Обмежившись першим членом ряду (оскільки ряд швидко сходиться) і зробивши певні перетворення за О. Ликовим отримаємо спрощене рівняння кінетики екстракції твердого тіла (за аналогією кінетики сушіння) з джерелом видалення рідкої фази речовини, що екстрагується у вигляді:

$$-\frac{dc(\tau)}{d\tau} = k_e(c(\tau) - c_p(\tau)) - Q_m, \quad (15)$$

де $k_e = \mu_1^2\frac{R^2}{D_{ef}}$ – коефіцієнт екстракції; $Q_m = q_m\mu_1^2\left(1 + \frac{3}{Bi_m}\right)$; $\mu_1^2 = 2.363Bi_m - 1{,}398$; $c_p(\tau) = n(c_0 - c(\tau))$; $n = \frac{V_m}{V_p}$.

Розв'язок рівняння (15) за початкової умови: $\tau = 0$; $c = c_0$ отримаємо у вигляді:

$$c(\tau) = B - (B - c_0)e^{-k_e(1+n)\tau}, \quad (16)$$

де $B = \frac{1}{1+n}\left(nc_0 + \frac{Q_m}{k_e}\right)$.

З аналізу залежності (16) випливає, що величина B дорівнює значенню концентрації цільового компонента твердої фази у встановленому режимі (кінцева, рівноважна концентрація c_∞).

Для використання алгоритму Левенберга-Макварда для пошуку невідомих масообмінних коефіцієнтів (значення внутрішнього джерела видалення рідкої фази під дією мікрохвильового поля $q_m(N)$, і коефіцієнти масообміну – β, D_{ef}) в рівнянні (14) за даними отриманими з емпіричної залежності, спочатку апроксимуємо чисельні розв'язки μ_1, μ_2,μ_3,μ_4,μ_5 трансцендентного характеристичного рівняння (14).

Для μ_1–μ_5 після проведених числових експериментів з різними апроксимуючими математичними структурами визначена залежність з найвищим рівнем множинної кореляції виду:

$$\mu = b_0 + \frac{Bi_m}{b_1 + b_2 \cdot Bi_m}. \qquad (17)$$

Таким чином, подальше розв'язання задачі потребує експериментальних досліджень.

Отримані наближені розв'язки наведених теоретичних моделей дозволяють ідентифікувати процеси масоперенесення в екстракторах з мікрохвильовим підведенням енергії для подальшої оптимізації режимів функціонування екстракторів.

Такий напрям досліджень дає змогу провести аналіз бази експериментальних даних, визначити вплив конкретних параметрів, але не дозволяє побудувати обґрунтовану інженерну методику для проєктування екстракторів промислового призначення.

У зв'язку з труднощами, що пов'язані з аналітичним моделюванням, слід застосувати експериментальне моделювання, основною науковою базою якого є теорія подібності й метод «аналізу розмірностей».

На основі вихідних параметрів побудовано параметричну модель процесу екстрагування в мікрохвильовому полі (рис. 4).

Вихідна функціональна залежність коефіцієнту масовіддачі рівна:

$$\beta = f(M_{пр}, D, \Delta C, d, \rho, \mu, M_{роз}, r, N, g). \qquad (18)$$

Список перерахованих параметрів представлений в таблиці 2.

Всі ці параметри містять тільки три основних розмірності: довжину (L), масу (M) і час (T). Користуючись аналізом розмірностей, замінимо цю невідому функцію залежністю між критеріями подібності. В даному випадку число змінних a=11, число їх одиниць виміру b=3. Тоді, згідно π- теореми, число безрозмірних комплексів, що описують процес, має дорівнювати a–b=8.

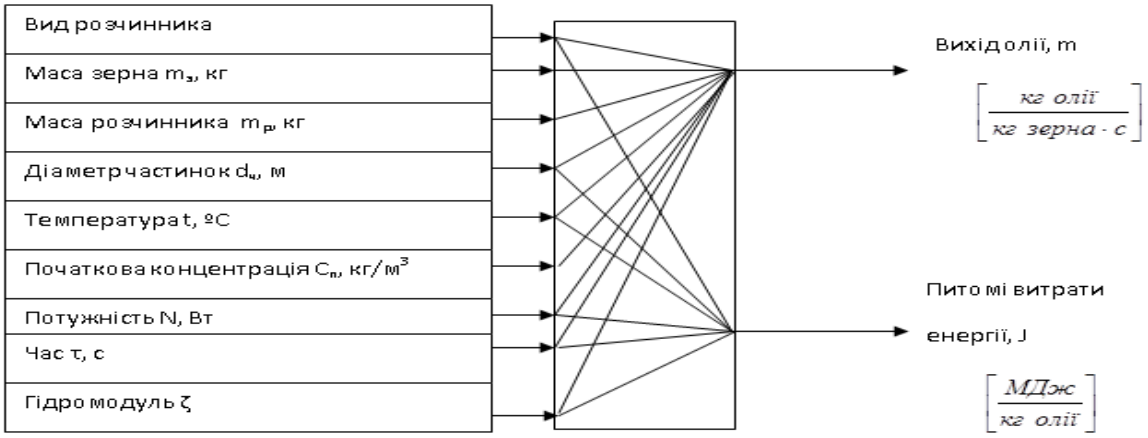


Рис. 4. Параметрична модель процесу екстрагування в мікрохвильовому полі

Таблиця2

Список параметрів

Параметр	Символ	Розмірність
Середній коефіцієнт масовіддачі	β	м · с$^{-1}$
Витрати продукту	$M_{пр}$	кг · с$^{-1}$
Коефіцієнт дифузії олії	D	м^2· с$^{-1}$
Різниця концентрацій	ΔC	кг · м$^{-3}$
Розмір частинки, яку піддають екстрагуванню	d	м
густина масового потоку	ρ	кг · м$^{-3}$
В’язкість потоку	μ	кг · м$^{-1}$ · с$^{-1}$
Витрати розчинника	$M_{роз}$	кг · с$^{-1}$
пароутворення	r	м^2· с$^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	кг· м^2· с$^{-3}$
Гравітаційна постійна	g	м ·с$^{-2}$

Функціональна залежність коефіцієнта масовіддачі від параметрів (18) згідно аналізу розмірностей представлена у вигляді степеневого ряду:

$$\beta = A\mathrm{M}_{пр}{}^{\alpha} D^{\gamma} \Delta C^{\delta} d^{\varepsilon} \rho^{\eta} \mu^{\theta} M_{\text{роз}}{}^{\iota} \mathrm{r}^{\kappa} N^{\lambda} g^{\nu} \qquad (19)$$

Обравши три основні розмірності, решту розмірностей виразимо через первинні величини:

$$\frac{\mathrm{L}}{T} = A\left[\frac{M}{T}\right]^{\alpha} \cdot \left[\frac{L^2}{T}\right]^{\gamma} \cdot \left[\frac{M}{L^3}\right]^{\delta} \cdot [L]^{\varepsilon} \cdot \left[\frac{M}{L^3}\right]^{\eta} \cdot \left[\frac{M}{L \cdot T}\right]^{\theta} \cdot \left[\frac{M}{T}\right]^{\iota} \cdot \left[\frac{L^2}{T^2}\right]^{\kappa} \cdot \left[\frac{M \cdot L^2}{T^3}\right]^{\lambda} \cdot \left[\frac{L}{T^2}\right]^{\nu} \qquad (20)$$

Зрівняємо показники усіх одиниць вимірювання лівої і правої частини (20) та на основі розмірної матриці отримаємо систему із трьох алгебраїчних рівнянь із 11 невідомих.

Результат розв’язання можна подати у такому вигляді:

$$\frac{\beta d\rho}{\mu} = \left(\frac{M_{\text{пр}}}{d\mu}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{\mu}{D\rho}\right)^{-\gamma} \cdot \left(\frac{\Delta C}{\rho}\right)^{\delta} \cdot \left(\frac{M_{роз}}{d\mu}\right)^{\iota} \left(\frac{d^2\rho^2 r}{\mu^2}\right)^{\kappa} \left(\frac{d\rho^2 N}{\mu^3}\right)^{\lambda} \left(\frac{d^3\rho^2 g}{\mu^2}\right)^{\nu} \qquad (21)$$

Комплекси отримані в рівнянні дають комбінації, які утворюють структуру рівняння в узагальнених замінних:

Комплекс $\left(\frac{M_{пр}}{d\mu}\right)^{\alpha}\cdot\left(\frac{d\mu}{M_{роз}}\right)^{-\varepsilon}=\left(\frac{M_{пр}}{M_{роз}}\right)=\zeta$ є безрозмірним і враховує співвідношення твердої і рідкої фаз.

Групи $\frac{\beta d\rho}{\mu}$ і $\frac{\mu}{D\rho}$ дають відношення коефіцієнта конвективного масообміну до коефіцієнта дифузії – число Шервуда

$$\frac{\beta d\rho}{\mu}\cdot\frac{\mu}{D\rho}=\frac{\beta d}{D}=Sh. \tag{22}$$

Відношення кількості руху потоку до дифузійного потоку – число Шмідта

$$\frac{\mu}{D\rho}=\frac{\nu}{D}=Sc \tag{23}$$

.

Відповідно число подібності Грасгофа

$$\frac{\Delta C}{\rho}\cdot\frac{gd^3\rho^2}{\mu^2}=\frac{gd^3\Delta C\rho}{\mu^2}=Gr \tag{24}$$

В наших дослідженнях домінуючим є вплив мікрохвильового поля і в режимі інерційного потоку внесок природної конвекції незначний. Тому впливом числа *Gr* можна знехтувати тоді будемо мати:

$$\left(\frac{\mu^2}{d^2\rho^2 r}\right)^{-\kappa}\cdot\left(\frac{Nd\rho^2}{\mu^3}\right)^{\lambda}\cdot\left(\frac{M_{роз}}{d\mu}\right)^{-1}=\frac{N}{V\rho r}=Bu, \tag{25}$$

де Bu – число Бурдо, число енергетичної дії, що встановлює співвідношення між енергією випромінювання й енергією, яка необхідна для перетворення в пару всього розчину, що проходить через екстрактор. Отже, структура критеріального рівняння через числа подібності буде наступною:

$$Sh=A\cdot Sc^{\sigma}\cdot\zeta^{\phi}\cdot Bu^{\chi} \tag{26}$$

Константи *A*, σ, φ, χ визначаються експериментально.

У **п'ятому розділі** «Теоретичні дослідження процесів сушіння олієвмісної сировини у сушарці з інфрачервоним підведенням енергії».

Для сушіння невеликих об'ємів насіннєвого матеріалу найбільш доцільно використовувати сушарки періодичної дії, лоткового або контейнерного типу з вібраційним переміщенням і перемішуванням матеріалу. При накладанні вібрацій на шар дисперсного матеріалу в прямокутному або U-подібному жолобі, рух матеріалу набуває циркуляційний характер; віброзріджений матеріал циркулює у «віброзваженому» шарі, частинки якого рухаються по замкненій траєкторії підіймаючись на поверхню шару та опускаючись донизу. На поверхні шару частинки опромінюються джерелом ІЧВ і акумулюючи променеву енергію, занурюються в глибину шару, де їх температура внаслідок випаровування вологи перерозподіляється, вирівнюючи температурне поле. Таким чином, в процесі циркуляції шару частинки опромінюються періодично, з періодом, що визначається кінематичними параметрами вібрацій. Розглянуто можливі варіанти реалізації процесу сушіння у віброзрідженому шарі лоткової

сушарки (з U-подібним контейнером) при осцилюючому режимі (рис. 5) і безперервному нагріванні.

Математична модель процесу сушіння побудована на основі балансових співвідношень для періодичного режиму.

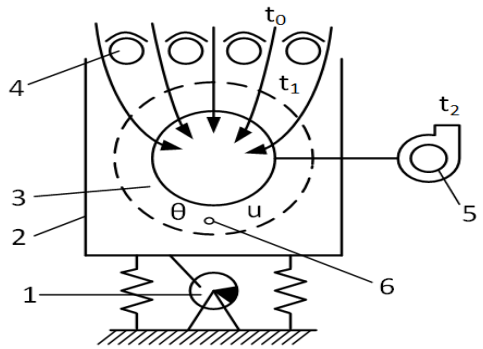


Рис. 5.Схема вібросушарки:
1 – віброзбудник; 2 – корпус; 3 – колектор;4 – ІЧВ; 5 – вентилятор; 6 – матеріал.

Рівняння збереження енергії для інфрачервоного джерела випромінювання:

$$P(\tau)=m_v c_v\frac{\partial\theta_v}{\partial\tau}+\sigma\varepsilon'_{np}10^{-8}\left(T_v^4-T_z^4\right)F_v+ \\ +\alpha'_v F_v(\theta_v-t_{oc})+\alpha_k F'_v(\theta_v-t) \quad ;(27)$$

Інтегральне рівняння теплообміну:

$$m_z c_z(u)\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+m_0 r\frac{\partial u}{\partial\tau}+\sigma\varepsilon''_{np}10^{-8}\left(T_z^4-T_{oc}^4\right)=\sigma\varepsilon_{np}A_\lambda 10^{-8}\left(T_v^4-T_z^4\right)+\alpha_{ef}F_k(\theta-\theta_k); \quad (28)$$

теплового балансу для повітря:

$$m_n c_n\frac{\partial t}{\partial\tau}+G_n c_p h\frac{\partial t}{\partial x}=\alpha_k f(\theta-t)+\alpha_k F_v(\theta_v-t); \quad (29)$$

кінетики сушіння:

$$-\frac{\partial u}{\partial\tau}=k(\theta)(u-u_p); \quad (30)$$

матеріального балансу для вологи в повітрі:

$$m_n\frac{\partial d}{\partial\tau}+G_n h\frac{\partial d}{\partial x}=-m_0\frac{\partial u}{\partial\tau}; \quad (31)$$

теплового балансу для стінки корпусу:

$$m_k c_k\frac{\partial\theta_k}{\partial\tau}=\alpha_{ef}F_{kv}(\theta-\theta_k)-\alpha_k F_{ko}(\theta_k-t_{ac}); \quad (32)$$

де $T_v=\theta_v+273$; $T_z=\theta+273$; $T_{oc}=t_{oc}+273$; $k(\theta)=a_m(\theta)\left(R^2\left(\frac{1}{5}+\frac{1}{Bi_m}\right)\right)^{-1}$;

$$Bi_m=\frac{\alpha R}{a_m}=Nu_m\frac{D_n}{a_m}=2+0.51\,\mathrm{Re}^{0.52}\,\mathrm{Pr}_m^{\,0.33};\quad \mathrm{Re}=\frac{vR}{\upsilon};\quad \mathrm{Pr}_m=\frac{\upsilon}{a};\quad \alpha'_v=\alpha_v+\alpha_k;$$

$P(\tau)$ – потужність випромінювача; $\theta_v,\theta,t,\theta_k,t_{oc}$ – температура випромінювача, зернового матеріалу, повітря в камері, стінки, корпусу, навколишнього середовища; u,d – вологовміст матеріалу і повітря; σ,ε_{np} – стала Стефана-Больцмана, приведена випромінювальна здатність; m_o,m_n,m_v – маса сухого матеріалу, повітря в камері, випромінювача; c_z,c_p,c_v,c_k – питома теплоємність насіння, повітря, випромінювача, корпусу; F_v,F'_v,f_z,F_k – поверхня випромінювання, випромінювача, насіння, стінок корпусу; r –

питома теплота пароутворення; G_n – масові витрати повітря; h – товщина рухомого шару матеріалу; $\alpha_v', \alpha_k, \alpha_{ef}$ – коефіцієнт теплообміну випромінюванням, конвекцією, ефективний коефіцієнт кондуктивного теплообміну; $k(\theta)$ – коефіцієнт сушіння; $a(u)$ – коефіцієнт масопровідності; R – радіус частинки; Bi_m – число Біо масообмінне; Nu_m – число Нусельта масообмінне; Re – число Рейнольдса; Pr_m – масообмінне число Прандтля; β – коефіцієнт масообміну; υ – кінематична в'язкість повітря; v – швидкість повітря; D_n – коефіцієнт дифузії вологи в повітрі.

Отримана математична модель являє систему нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних, які описують кінетику процесу сушіння насіннєвого матеріалу у віброзріджено-вихровому шарі при радіаційно-конвективному підведені теплової енергії.

Незважаючи на замкненість отриманої системи рівнянь її розв'язок суттєво ускладнений навіть при використанні ЕОМ, оскільки до диференціальних рівнянь входять коефіцієнти і безрозмірні комплекси, значення яких можна визначити тільки експериментально.

Для ідентифікації параметрів математичної моделі бажано мати аналітичні залежності, отримані з вихідної системи рівнянь (27-32) при додаткових спрощеннях. Після відповідних перетворень, з врахуванням зроблених припущень і заміною похідної $\partial u/\partial\tau$ (відповідно до числа Ребіндера $Rb = \dfrac{c}{r}\dfrac{\partial u}{\partial\tau}$) на величину $-\dfrac{\partial u}{\partial\tau} = \dfrac{c}{r}\dfrac{\partial\theta}{\partial\tau}$, замість системи рівнянь (27-32) отримано спрощену систему рівнянь відповідно до кількості невідомих (шуканих) величин. За умов, що кожна частинка (при високочастотному осцилюванні) рівномірно опромінюється джерелом з величиною густини опромінення $E(\tau)$ (енергетична освітленість) буде величиною сталою $E = E_{\max} = const$, за початкових умов: $\tau = 0, \theta = \theta_0$ отримано:

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)}\left(r_1 e^{r_2\tau} - r_2 e^{r_1\tau}\right) + \frac{D_1(\tau)}{C}; \qquad (33)$$

де $r_{1,2} = \dfrac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ – корені характеристичного рівняння.

За умов $\tau = 0, t = t_1$ отримано рівняння кінетики сушіння:

$$\frac{u - u_1}{u - u_p} = \exp\left(-k(Bi_m)\left(\left(b_3 + \frac{D_1}{C}\right)\tau + k_t\left(\frac{r_1}{r_2}e^{r_2\tau} - \frac{r_2}{r_1}e^{r_1\tau}\right)\right)\right), \qquad (34)$$

де $k_t = \dfrac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)}$.

За умов $\tau = 0, \theta = \theta_0, E = E_m$ при після деяких перетворень отримано:

$$\theta(\tau) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + \frac{k_1}{C} + \frac{B_1}{a^2 + b^2}(b \sin \omega\tau - a \cos \omega\tau), \qquad (35)$$

де $a = A\omega^2 - C$; $b = B\omega$; $C_1 = \frac{r_2}{r_2 - r_1}\left(\theta_0 + \frac{k_1}{C} + \frac{B_1}{a^2 + b^2}\left(a - \frac{b\omega}{r_2}\right)\right)$;

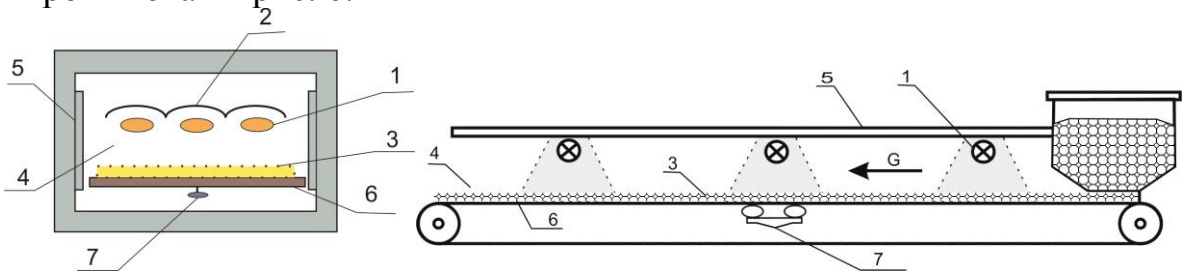
$C_2 = \frac{r_1}{r_1 - r_2}\left(\theta_0 - \frac{k_1}{C} + \frac{B_1}{a^2 + b^2}\left(a - \frac{b\omega}{r_1}\right)\right)$.

Після поділу змінних та інтегрування в межах від u_1 до u і від $\tau = 0$ до τ; та після перетворень матимемо:

$$u(\tau) = u_p + (u_1 - u_p)\exp\left[-k(Bi_m)\left(\begin{array}{l} b_3 + a_3 \frac{k_1}{C}\tau + a_3\left(\frac{C_1}{r_1}e^{r_1\tau} + \frac{C_2}{r_2}e^{r_2\tau}\right) - \\ - \frac{B_1}{\omega(a^2 + b^2)}(b \cos \omega\tau - a \sin \omega\tau) \end{array}\right)\right]. \qquad (36)$$

Отримані рівняння (35) і (36) описують процеси зміни температури й вологовмісту матеріалу при сушінні радіаційно-конвективним теплопідведенням зі змінною в часі потужністю джерела ІЧВ.

Розглянута сушарка, що являє собою вібраційну поверхню вздовж якої переміщується зерновий матеріал, з якого видаляється волога шляхом теплової енергії, що передається випромінюванням від інфрачервоних (ІЧ) випромінювачів рис. 6.



а) б)

Рис. 6. Схема експериментальної інфрачервоної сушарки:

а) – розрахункова схема; б) – технологічна схема: 1 – ІЧ-нагрівач; 2 – екран; 3 – віброзріджений шар зерна; 4 – сушильний агент – повітря; 5 – бокові екрани; 6 – транспортер; 7 – віброзбуджувач.

З метою спрощення аналізу даного процесу прийнято такі припущення: теплофізичні параметри матеріалу і повітря від температури не залежать і в першому наближенні приймаються середніми за процес; градієнти температури й вологовмісту за розміром частинок зернового матеріалу не враховуються (нагрів і зневоднення в окремих зернах безградієнтні); температура стрічки, екранів, випромінювачів однакові за довжиною і в поперечному перерізі апарату (сушарки); кількість вологи, що видаляється з матеріалу пропорційна вологовмісту, а коефіцієнт пропорційності залежить від температури лінійно.

Відповідно до наведеного опису і зроблених припущень сформульовано рівняння теплового і матеріального балансів за час $d\tau$ на відрізку dy в напрямку руху шару зернового матеріалу:

$$P = m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + c_{12} F_{12}\left(T_1^4 - T_2^4\right) + c_{13} F_{13}\left(T_1^4 - T_3^4\right) + c_{15} F_{15}\left(T_1^4 - T_5^4\right) + \alpha'_{14} F_1\left(\theta_1 - t\right); \quad (37)$$

$$c_{12} F_{12}\left(T_1^4 - T_2^4\right) = m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} + c_{25} F_{25}\left(T_2^4 - T_5^4\right) + c_{23} F_{23}\left(T_2^4 - T_3^4\right) + \alpha'_{24} F_2\left(\theta_2 - t\right); \quad (38)$$

$$A_\lambda\left[c_{13} F_{13}\left(T_1^4 - T_3^4\right) + c_{23} F_{23}\left(T_2^4 - T_3^4\right)\right] = m_з c_з \frac{\partial \theta_з}{\partial \tau} + G_з c_з L \frac{\partial \theta_з}{\partial y} + \alpha'_{34} F_{34}\left(\theta_з - t\right) + \\ + \alpha_6 F_6\left(\theta_з - \theta_6\right) \pm c_{35} F_{35}\left(T_3^4 - T_5^4\right) + r\left[m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_0 L \frac{\partial U}{\partial y}\right]; \quad (39)$$

$$m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14} F_1\left(\theta_1 - t\right) + \alpha'_{24} F_2\left(\theta_2 - t\right) + \alpha'_{34} F_3\left(\theta_3 - t\right) + \alpha'_{54} F_5\left(\theta_5 - t\right); \quad (40)$$

$$c_{15} F_{15}\left(T_1^4 - T_5^4\right) = m_5 c_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \tau} + \alpha'_{54} F_{54}\left(\theta_5 - t\right); \quad (41)$$

$$\alpha'_e F_6\left(\theta_з - \theta_6\right) = m_6 c_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \tau} + \alpha'_6 F_6\left(\theta_6 - t'\right); \quad (42)$$

$$\frac{c_з}{Rb}\left(\frac{\partial \theta_з}{\partial \tau} + \frac{G_з L}{m_з}\frac{\partial \theta_з}{\partial y}\right) = -r\left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{G_4 L}{m_{з0}}\frac{\partial U}{\partial y}\right); \quad (43)$$

$$-\left(m_3 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_3 L \frac{\partial U}{\partial y}\right) = m_4 G_4\left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + G_4 L \frac{\partial d}{\partial y}\right), \quad (44)$$

де індекси в позначеннях коефіцієнтів вказують на приналежність до об'єктів тепломасообміну (рис. 6 а)); $\alpha_{ij}^{/}$ – коефіцієнти складеного теплообміну, F_{ij}– поверхні, м^2; T_i – температура джерела енергії, К; t – температура повітря, К; θ – температура матеріалу, що висушується, К; C_{ij} – приведений коефіцієнт випромінювання; P – потужність випромінювача, Вт; L – довжина транспортера, м; m_i, G_i – маса об'єкту, та його витрати, кг, кг/с; m_i,c_i – теплоємність об'єктів, Дж/К; A_λ – коефіцієнт поглинання випромінювання; r – приведена теплота пароутворення, Дж/кг; Rb – критерій Ребіндера; U – вологовміст матеріалу, кг/кг.

Система нелінійних диференціальних рівнянь (37-44) являє математичну модель динамічних режимів сушильної установки з ІЧ-підведенням енергії й може бути розв'язана числовим методом при заданих граничних умовах і числових значеннях коефіцієнтів, які розрахунками визначить досить складно. Для теоретичного аналізу теплових масообмінних процесів в наявних комп'ютерних середовищах і отримання аналітичних розрахункових залежностей отриману систему нестаціонарних процесів необхідно ще спростити.

Після розв'язку ряду системи рівнянь за початкових умов: $\tau = 0; \theta_3 = \theta_0 = \theta_1; t = t_0 = t_1; \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0$, де θ_0, t_0 – початкові значення температури насіння й повітря, які дорівнюють їх значенням на вході отримаємо рівняння,

які описують зміну температури насіння й повітря в часі та за довжиною сушильної камери.

$$\theta_3(\tau, y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r_1' - r_2')}\left(r_1' e^{r_2'\tau} - r_2' e^{r_1'\tau}\right) + \frac{D_1(y)}{C}; \quad (45)$$

$$t(\tau, y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r_1' - r_2')}\left(r_1' e^{r_2'\tau} - r_2' e^{r_1'\tau}\right) + \frac{D_1(y)}{C}; \quad (46)$$

де $r_{1,2}' = \frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4AC}}{2A'}$; $A' = T_1 T_2$; $B' = a_1 T_2 + a_2 T_1$; $C = (a_1 a_2 - 1)$;

$D_1(y) = b_2(y) - a_2 b_1(y)$; $D_2(y) = b_1(y) - a_1 b_2(y)$.

Для отримання залежності зміни вологовмісту матеріалу за часом і координатою про диференціюємо рівняння (45) за часом:

$$\frac{d\theta_3(\tau, y)}{d\tau} = K_\tau(y) r_1' r_2' \left(e^{r_2'\tau} - e^{r_1'\tau}\right); \quad (47)$$

де $K_\tau(y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r_1' - r'_2)}$ і підставимо отримане значення в рівняння визначення числа Ребіндера: $c_з(U)\frac{d\theta}{d\tau} = -Rb(U) r_0 \frac{dU}{d\tau}$, за умови $\frac{Rb(U)}{c_3(U)} = A_R e^{nU}$, про інтегрувавши рівняння (45): $-A_R r_0 \int_{U_1}^{U} e^{nU} dU = K_\tau(y) r_1' r_2' \left[\int_0^\tau e^{r_2' y} d\tau - \int_0^\tau e^{r_1'\tau} d\tau\right]$, отримаємо:

$$U(\tau, y) = \frac{1}{n}\ln\left(e^{nU_1} - K_{c'}(y) \cdot \left[\frac{e^{r_2\tau} - 1}{r_2} - \frac{e^{r_1\tau} - 1}{r_1}\right]\right); \quad (48)$$

де $K_{c'}(y) = \frac{n \cdot K_\tau(y)}{A_R \cdot r_0} r_1' r_2'$.

Таким чином, основні динамічні характеристики режиму сушіння олієвмісного матеріалу в безперервно діючій установці з ІЧ-енергопідведенням можна описати рівняннями (45) і (48). Вони визначають розподіл температури й вологовмісту олієвмісного матеріалу за довжиною для будь-якого моменту часу. Для визначення параметрів олієвмісного матеріалу на виході потрібно прийняти: y=L. Тоді рівняння (45) і (48) будуть визначати зміну кінцевих параметрів матеріалу, тобто $U_2(\tau)$ і $\theta_2(\tau)$.

Для параметричної ідентифікації математичної моделі теплових і масообмінних процесів при ІЧ-сушінні зернових матеріалів (при вібраційному переміщенні) необхідно мати значення введених в рівняння коефіцієнтів.

Ідентифікацію отриманих математичних моделей можна провести за даними експериментів співставивши аналітичні й експериментально отримані залежності.

У **шостому розділі** «Результати експериментальних досліджень процесу екстрагування цільових компонентів із насіння сої й ріпаку». Експериментальна установки показано на рис.7. Діапазон експериментальних досліджень представлено в табл. 4.

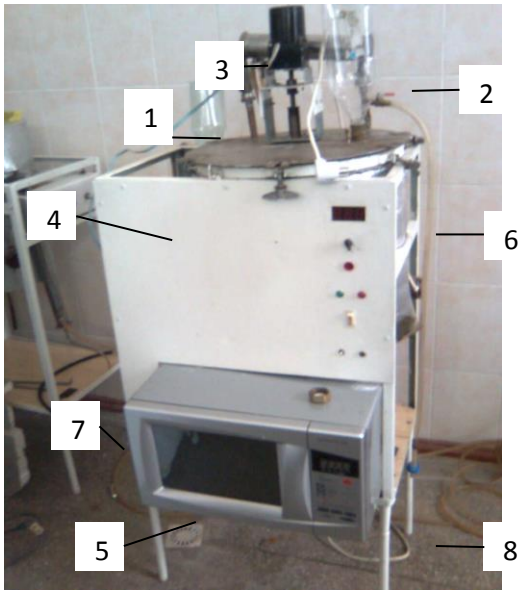


Рис. **7.** Екстрактор із мікрохвильовим інтенсифікатором (ЕМХІ):
1 – штуцер з ємністю для наповнення екстрактора розчинником; 2 – штуцер з ємністю для наповнення реакційного об'єму твердою фазою; 3 – зворотний холодильник; 4 – екстрактор; 5 – електромагнітний інтенсифікатор; 6 – датчик для вимірювання температури проміжного теплоносія; 7 – датчик для вимірювання температури продукту на вході в МХІ; 8 – датчик для вимірювання температури продукту на виході з МХІ.

В п л и в т е м п е р а т у р и . Дослідження фактору температури на процес екстрагування проводилось термостаті ТС-80М2 при екстрагуванні макухи сої гексаном (рис. 8). Зі збільшенням температури на 10 ºС концентрація та вихід цільового компонента зростала в середньому на 10 %. Підвищення температури до кипіння розчинника давало економію часу на 97%, у порівнянні із настоюванням у термостаті, та збільшення концентрації олії в середньому на 30 %.

Таблиця 4

Діапазон умов проведення експериментальних досліджень

Вид сировини		Фракція	Гідромодуль	Температура, ºС	Розчинник	Вплив поля імпульсної дії	Потужність, Вт	Час дослідження
Ріпак озимий, сорт «Чемпіон»	Зерно	0,5-1 мм; ціле зерно	1:3	Від 12ºС – до температури кипіння розчинника	Спирт і гексан	У полі та без поля	127; 255; 425	Від 5 хв. до 24 год.
	Макуха	0,5-1 мм; 2-4 мм; 5-7 мм	1:3, 1:5, 1:10, 1:20					
2. Соя, сорт «Вінничанка»	Зерно	0,5-1 мм; ¼ зерна; ціле зерно	1:3					
	Макуха	0,5-1 мм; 2-4 мм; 5-7 мм	1:3, 1:5, 1:10, 1:20					

При екстрагуванні сої етиловим спиртом шляхом настоювання протягом однієї доби при температурі навколишнього середовища (12ºС) концентрація олії у 1,5-2 рази була менша, ніж при витримці протягом 5год із температурами 30-60ºС. (рис. 9).

В п л и в г і д р о м о д у л я . Серед досліджуваних співвідношень сировини до розчинника розглядались 1:2, 1:3, 1:5, 1:10, 1:20. Гідромодуль 1:2 дав невдалий результат. Були отримані міцели, у яких присутні частинки твердої фази і кількості рідкої фази при взятому співвідношенні було недостатньо.

Дані концентрації олії гідромодуля 1:3, у порівнянні з 1:5, 1:10, 1:20, були найменшими. Підвищення частки розчинника щодо твердої фази призводило до зменшення кінцевої концентрації в середньому у 4 – 6 разів. Тому співвідношення 1:3 є рекомендованим в екстрагуванні насіння сої та ріпаку з використанням мікрохвильового впливу.

В п л и в р о з ч и н н и к а . У класичних технологіях при екстрагуванні олії використовуються неполярні аліфатичні вуглеводні завдяки їхній найбільшій ефективності серед розчинників. У зв'язку із використанням як інтенсифікуючи дій мікрохвильового поля, було проведено також дослідження із полярним етиловим спиртом, інтенсивність вилучення якого під дією МХ опромінення зросла до ефективності гексану (рис. 10).

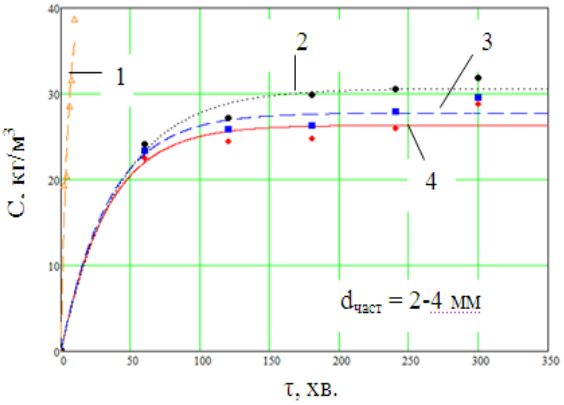


Рис. 8. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи сої гексаном при температурах: 1 – 68,7 ºС, 2 – 50 ºС, 3 – 40 ºС, 4 – 30 ºС

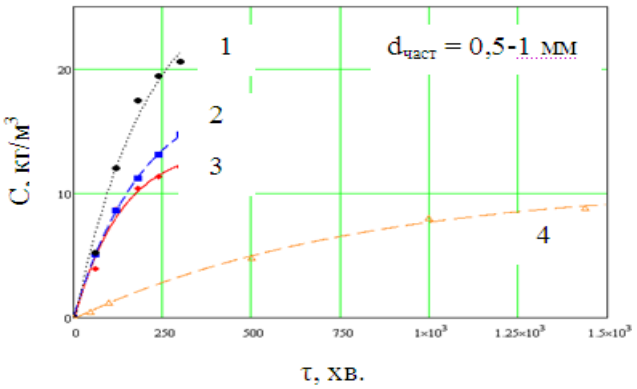


Рис. 9. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні подрібненого зерна сої етиловим спиртом при температурах: 1 – 60 ºС, 2 – 50 ºС, 3 – 30 ºС, 4 – 12 ºС.

У дослідженні процесу екстрагування без впливу мікрохвильового поля розчинник гексан значно ефективніший, ніж етиловий спирт (рис.11).

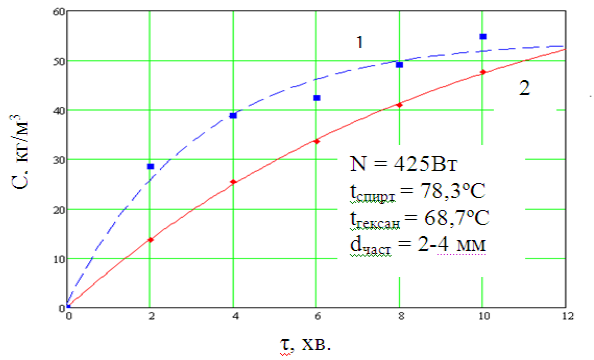


Рис. 10. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи ріпаку гексаном (1) та спиртом (2)

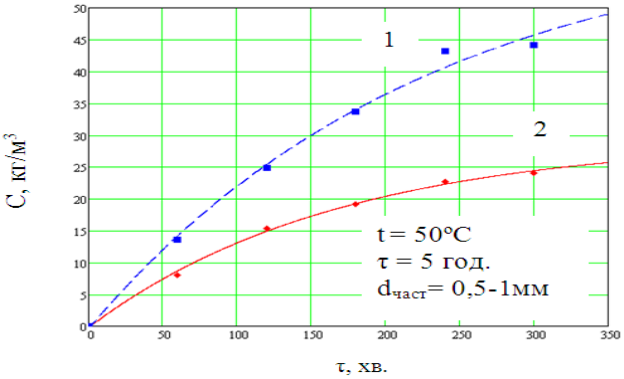


Рис. 11. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні насіння ріпаку гексаном (1) та спиртом (2)

Враховуючи ефективність ступеня вилучення олії під дією мікрохвильового поля полярним етиловим спиртом, а також нетоксичність, безпечність, необов'язковість проведення процесу дезодорації, що передбачає використання високих температур (210 – 240°С) і є згубним для біологічно активних речовин, рекомендованим розчинником для екстрагування у МХ полі є етиловий спирт.

Вплив подрібнення. На рисунках 12, 13 показано, що зі збільшенням ступеня подрібнення сировини, відбувалось збільшення концентрації на 15 – 35% олії в розчиннику. Проводились досліди із фракцією ”борошно”, яка мала розмір 0,25мм і менше. Через те, що порушувалась структура клітин, отримували нестабільний результат: при екстрагуванні разом із цільовими компонентами в розчин переходить і велика частина баластних речовин та утворюються нові структури – колоїдні форми. Крім того, для бародифузії, в основі якої є підвищення тиску в середині капілярів сировини, необхідна часткова цілісність капілярів. Тому мінімальний рекомендований ступінь подрібнення – 0,5-1мм.

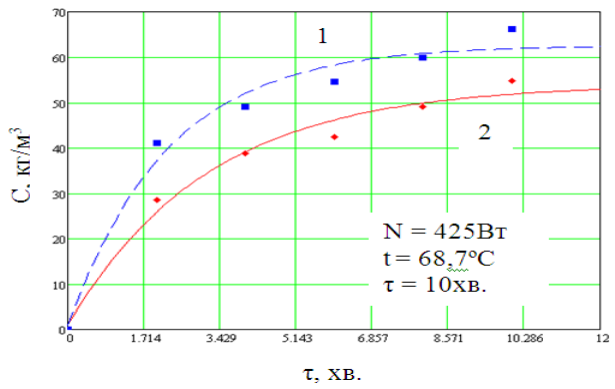


Рис. 12. Залежність концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи ріпаку різної фракції гексаном у МХ полі: 1 – фракція 0,5-1мм; 2 – фракція 2-4 мм

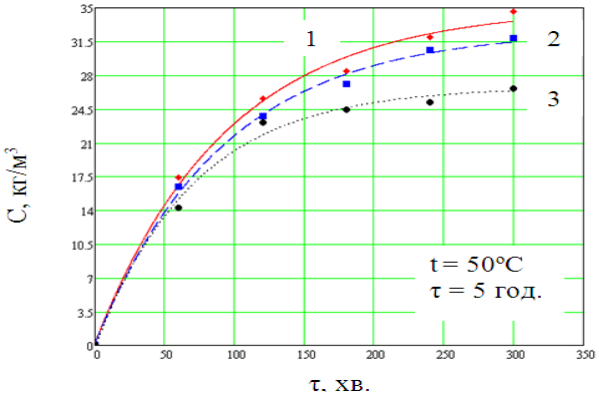


Рис.13. Залежність концентрації олії від часу при екстрагуванні насіння сої різної фракції гексаном: 1 – фракція 0,5-1мм; 2 – фракція 2-4 мм; 3 – фракція 5-7 мм

Вплив мікрохвильового опромінення. Порівнюючи концентрації олії, що отримали в результаті екстрагування подрібнених зерен ріпаку та сої з використанням мікрохвильового поля, із процесом екстрагування при температурах кипінням розчинників при звичайних умовах, вилучення олії збільшувалось у середньому у 3,4 рази (рис.14). Інтенсифікувався процес екстрагування мікрохвильовим полем ефективніше, ніж кипіння класичним методом. Це пов’язано із дією бародифузії. При екстрагуванні макухи досліджуваних культур в МХ полі, інтенсифікування сягало до 2 разів, це пов’язано із порушенням клітинної цілісності макухи після проходження технологічної схеми пресування, а отже, значним полегшенням подальшого процесу екстрагування олії розчинником (рис. 15).

Вплив потужності мікрохвильового поля. На рисунках 16 та 17 за постійних умов змінювалась потужність мікрохвильового поля: 127 Вт, 255 Вт, 425 Вт.

Ріст потужності інтенсифікував процес екстрагування шляхом підвищення температури процесу та бародифузії, яка виникає як наслідок підвищення тиску, дає утворення парових бульбашок, що інтенсифікують процес та вилучення важкодоступного компонента з капілярів із вузьким діаметром.

Після обробки експериментальних даних було отримано залежності коефіцієнта масовіддачі від числа енергетичної дії Bu, які представлені на рисунках 18, 19.

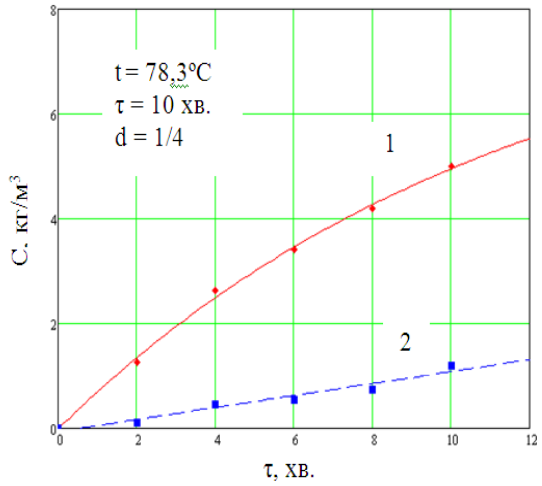


Рис. 14. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні подрібненого зерна сої спиртом: 1 – з МХ полем (425Вт); 2 – без МХ поля

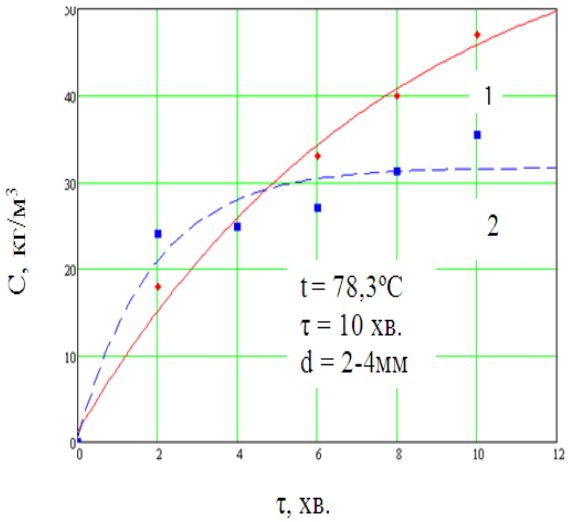


Рис. 15. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи ріпаку спиртом: 1 – з МХ полем (N=425Вт); 2 – без МХ поля

Отримані експериментальні дані дали змогу визначити константи A, σ, φ, χ в критеріальному рівнянні (36).

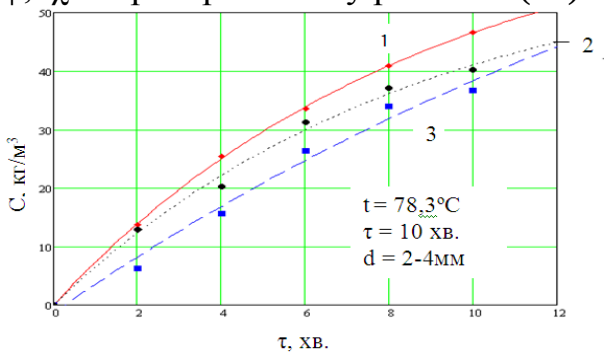


Рис. 16. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи ріпаку спиртом за потужності МХП: 1 – 425 Вт, 2 – 255 Вт, 3 – 127 Вт

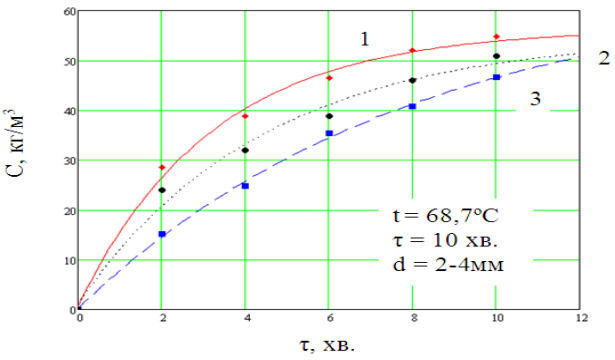


Рис. 17. Зміна концентрації олії від часу при екстрагуванні макухи ріпаку гексаном за потужності МХП: 1 – 425 Вт, 2 – 255 Вт, 3 – 127 Вт

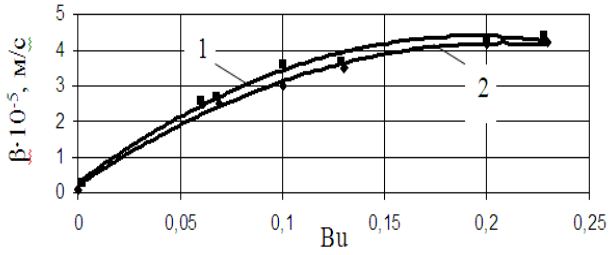


Рис. 18. Залежність коефіцієнта масовіддачі від числа Бурдо (Bu) при екстрагуванні олії етиловим спиртом із: 1– сої; 2 – ріпаку

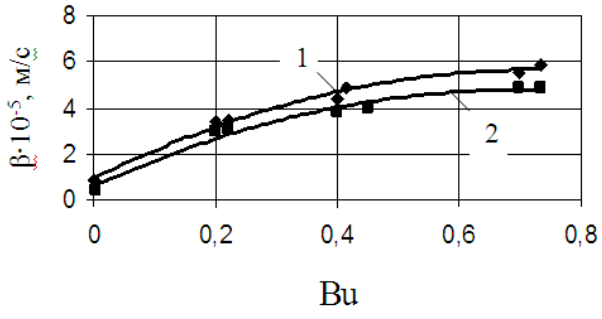


Рис. 19. Залежність коефіцієнта масовіддачі від числа Бурдо (Bu) при екстрагуванні олії гексаном із насіння: 1 – сої; 2 – ріпаку

У результаті отримано критеріальні моделі, що рекомендовані для розрахунку інтенсивності масоперенесення при екстрагуванні олії із насіння ріпаку та сої розчинниками гексаном та спиртом під дією мікрохвильового поля:

$$Sh = 1{,}7 \cdot Sc^{0,33} \cdot \varsigma^{0,34} \cdot Bu^{0,7}$$ – для умов ”ріпак – спирт” (49)

$$Sh = 0{,}9 \cdot Sc^{0,33} \cdot \varsigma^{0,4} \cdot Bu^{0,2}$$ – для умов ”ріпак – гексан” (50)

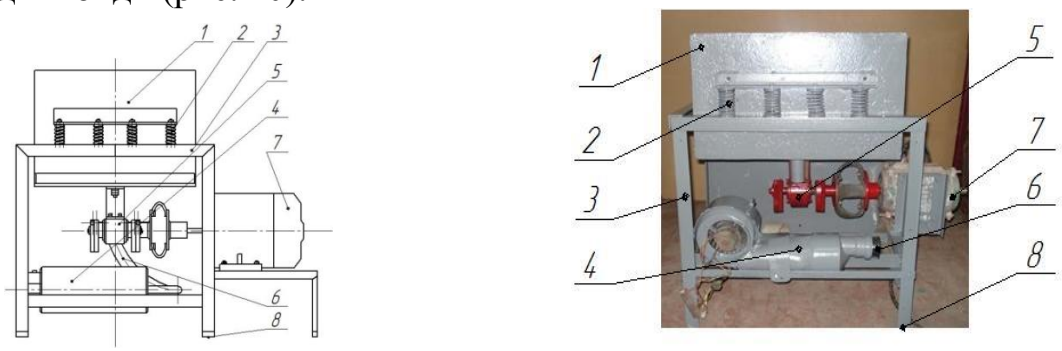
$$Sh = 1{,}8 \cdot Sc^{0,33} \cdot \varsigma^{0,34} \cdot Bu^{0,7}$$ – для умов ”соя – спирт” (51)

$$Sh = 0{,}7 \cdot Sc^{0,33} \cdot \varsigma^{0,4} \cdot Bu^{0,2}$$ – для умов ”соя – гексан” (52)

Загальна похибка розрахунку у відношеннях (49-52) у межах 8-16,5%.

У **сьомому розділі** «Експериментальне дослідження процесу ІЧ-сушіння в псевдозрідженому шарі». Визначено експериментально: вплив ступеня завантаження контейнера на кінетику сушіння насіння соняшнику його початкової вологості та параметрів вібрації робочого контейнера.

Експериментальні дослідження проводились на одноконтейнерній експериментальній вібраційній сушарці з U-подібним контейнером періодичної дії (рис. 20).



а) б)

Рис. 20. Одноконтейнерна експериментальна модель вібраційної сушарки з U-подібним контейнером: а) – принципова схема; б) – загальний вигляд сушарки; 1 – контейнер;2 – пружна підвіска; 3 – рама; 4 – вентилятор; 5 – вібропривод; 6 – газопідвідний патрубок; 7 – електродвигун; 8 – віброопора

Вібраційна сушарка (рис.20) складається з робочої камери 1, яка за допомогою гнучких елементів 2 встановлена на нерухомій рамі 3 і приводиться в коливальний рух де балансним віброприводом 5, змонтованим у нижній частині контейнера. Зверху робочої камери встановлено ІЧ-лампи для нагріву насіння соняшника. Через газовідвідний патрубок 6 і перфороване днище контейнера подається повітря за допомогою вентилятора 4, яке відбирає вологу від продукту та охолоджує його.

Дослідження впливу ступеня завантаження на видалення вологи проводились при завантажені контейнери П=0,75; 0,5 та 0,33, при потужності ІЧ 0,75 кВт та швидкості руху повітря 1,2 м/с, з початковою вологістю сировини W=25; 23%. З досліджень видно, що зі збільшенням ступеня завантаження контейнера триваліше проходить процес сушіння, але при незначному завантажені від П=0,4–0,33 процесу сушіння ускладнюється у зв’язку з конструктивними особливостями сушарки, та недостатньою інтенсивністю циркуляційного перемішування продукту в контейнері.

Кінетику сушіння насіння соняшника за отриманими експериментальними даним при різних степенях завантаженнях контейнера

представлено на рисунках 21, 22.

Експериментальні дослідження, проведені на вібраційній сушарці, показані на рис. 23, 24. При завантажених контейнерахП=0,75 та початковій вологості W=20,7%, 23% та 25% (рис. 23) після сушіння протягом 55 хв. Кінцева вологість продукту відповідно буде становити W=6%, 6,78% та 8,1%. На рис. 24 зображені графіки кінетики сушіння насіння соняшника при завантажених контейнерах П=0,5 та тривалості процесу сушіння 55 хв.

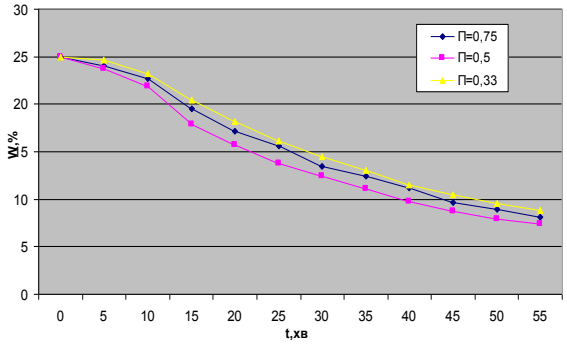


Рис. 21. Зміна вологості насіння соняшнику при різних завантаженнях контейнера з початковою вологістю сировини W=25%

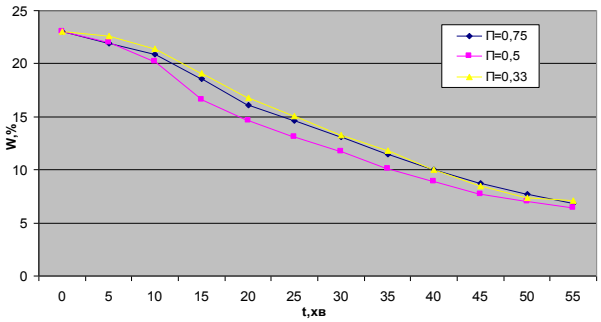


Рис. 22. Зміна вологості насіння соняшнику при різних завантаженнях контейнера, з початковою вологістю сировини W=23%

При початковій вологості W=20,7% кінцева буде становити W=6%; при початковій вологості W=23% кінцева буде становити W=6,44%; при початковій вологості W=25% кінцева буде становити W=7,4%. Експериментально встановлено, що швидкість сушіння спадає із зменшенням початкової вологості продукту.

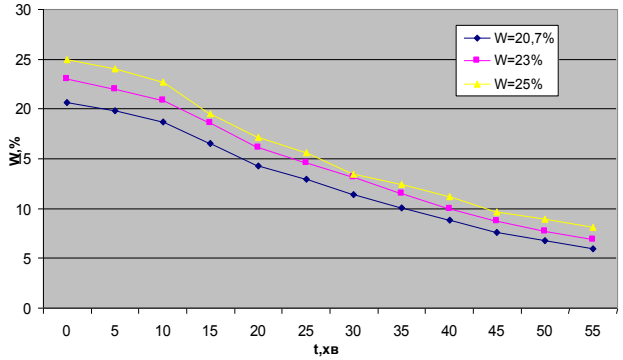


Рис. 23. Кінетика процесу сушіння насіння соняшника при початковій вологості W=20,7%, 23% та 25% і завантажені контейнера П=0,75

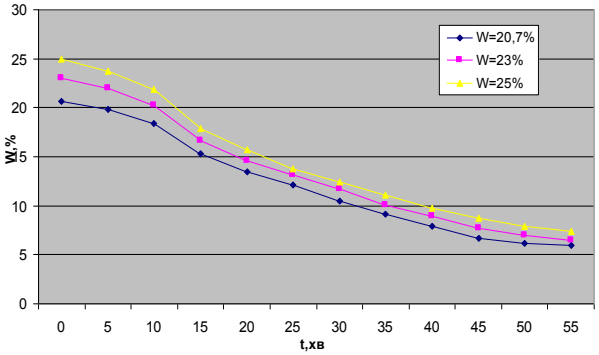


Рис. 24. Кінетика процесу сушіння насіння соняшника при початковій вологості W=20,7%, 23% та 25% і завантажені контейнера П=0,5

Результати досліджень впливу частоти коливань контейнера на кінетику процесу сушіння насіння соняшника, що має початкову вологість W=20,7%, 23% представлені на рис. 25, 26.

Аналіз представлених кривих показав рівномірне підвищення інтенсивності сушіння за всіма розглянутими частотами вібрації 80; 100; 120$с^{-1}$, але підвищення частоти вище f=100 $с^{-1}$ суттєвих результатів не дає. Тому оптимальним значенням вібрації можна прийняти f=80…100 $с^{-1}$.

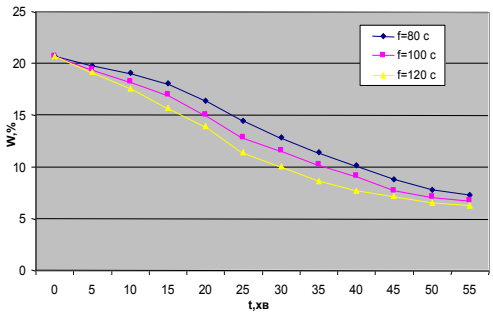


Рис. 25. Вплив частоти коливань контейнера на кінетику процесу сушіння насіння соняшника при їх початковій вологості W=20,7% і завантажені П=0,5

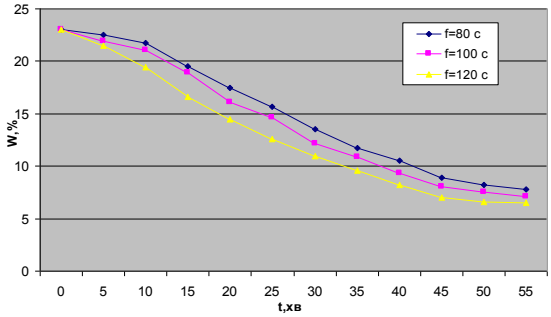


Рис. 26. Вплив частоти коливань контейнера на кінетику процесу сушіння насіння соняшника при їх початковій вологості W=23% і завантажені П=0,5

В контейнері сушарки завдяки вібраційним коливанням створюється псевдозріджений шар. Тому можна припустити, що загальну гідродинамічну ситуацію в апараті (рух частинок) може характеризувати сумарна середня швидкість потоку і відповідне число Рейнольдса (Re).

Тому, залежність для визначення числа Рейнольдса слід модифікувати, привівши його до характерних параметрів процесу сушіння в вібраційному полі.

Прийнявши в якості характерного розміру системи – діаметр оброблюваного матеріалу (зернини), а за характерну швидкість – частоту вібрації, модифіковане вібраційне (хвильове) число Рейнольдса набуде вигляду:

$$Re_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu}, \tag{53}$$

де ρ – щільність зерна; d – діаметр зернини; f – частота вібрації; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Співвідношення між конвективними й молекулярними процесами переносу тепла характеризується числом Пекле (Pe), яке є критерієм подібності для процесів конвективного теплообміну:

$$Pe_B = Re_B \cdot Sc, \tag{54}$$

де Sc – число Шмідта;

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \tag{55}$$

де D – коефіцієнт дифузії (волога – повітря); $D = 0{,}21 \cdot 10^{-4}$ м^2/с;

$$Pe_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu} \cdot \frac{\nu}{D}, \tag{56}$$

$$Pe_B = \frac{\rho d^2}{D}. \tag{57}$$

Модифіковане вібраційне число Стантона – число подібності:

$$St = \frac{\beta}{df}, \tag{58}$$

де β – коефіцієнт масовіддачі при сушінні.

Видалення вологи при сушінні за проміжок часу:

$$M = \beta F (C_H - C_\tau), \tag{59}$$

де F – площа поверхні зернини; $C_н$ – концентрація вологи в повітрі в умовах насичення при температурі повітря; $C_т$ – текуче значення концентрації вологи в повітрі.

Шукане рівняння (число Стантона) в узагальнених змінних набуде вигляду:

$$St_B = ARe_B^n П^m T^k, \quad (60)$$

де A, n, m, k – константи, визначення яких здійснюється на основі бази експериментальних даних;

$П$ – безрозмірний параметричний комплекс завантаження:

$$П = \frac{V_З}{V_П}, \quad (61)$$

де $V_З$ – об'єм завантаження; $V_П$ – об'єм контейнера; T – безрозмірна температура:

$$T = \frac{T_З}{T_П}, \quad (62)$$

де $T_З$ – температура насіння під час сушіння; $T_П$ – початкова температура насіння.

На базі експериментальних даних були визначені коефіцієнти масовіддачі β, числа подібності $Pe_в$ та St_B. Методами теорії подібності проведено узагальнення експериментальних даних, в результаті шукана модель набуде вигляду:

$$St_B = 97{,}4Re_B^{0{,}76} П^{0{,}91} T^{3{,}1}. \quad (63)$$

Критеріальна модель (63), якщо похибка не більше за 15% визначає коефіцієнти масовіддачі β.

Розділ вісім «Інженерна методика розрахунку інтенсивності сушіння в електромагнітних полях» присвячено накопиченню необхідних експериментальних даних для оцінки шуканих тепломасообмінних параметрів досліджуваного процесу сушіння в ІЧ та НВЧ полях для трьох методів його реалізації: у нерухомому та у рухомому шарі сировини.

Для кожної з даних груп дослідів (табл.5) була використана експериментальна база, що представлена на рис. 27.

а б

Рис. 27. Експериментальні лабораторні установки для проведення досліджень:
а – для нерухомого шару сировини; б – для рухомого шару сировини.

Таблиця 5

Діапазон експериментальних досліджень.

Вид сировини	Питома потужність НВЧ випромінення $N_{нвч}$, кВт/м^2	Питома потужність ІЧ випромінення$N_{iч}$, кВт/м^2	Завантаження стрічки g, кг/м^2	Тривалість процесу сушіння τ, хв	Температура сушіння Т, ^{0}С
Соняшник	7,5…15	7,33…11	3,96…7,92	30…45	34…39
Соя	7,5…15	7,33…11	4,8…9,6	40…70	35…41

Результати експериментальних досліджень інфрачервоного сушіння представлені на рис. 28, 29 для нерухомого шару сировини, на рис. 30 – 36 для рухомого шару, що дозволяє оцінити швидкість сушіння та продуктивність даних процесів при варіюванні технологічними параметрами.

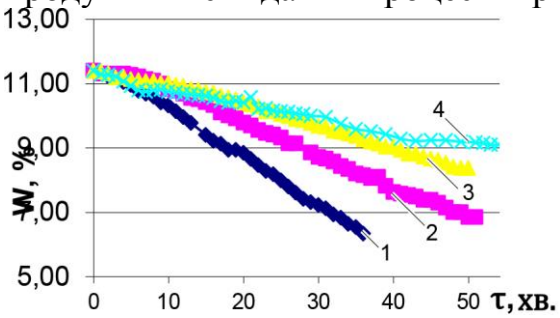


Рис. 28. Зміна вологості ріпаку при інфрачервоному сушінні для$N_в$=100 Вт: 1 – 100 г; 2 – 200 г; 3– 300 г; 4 – 400 г.

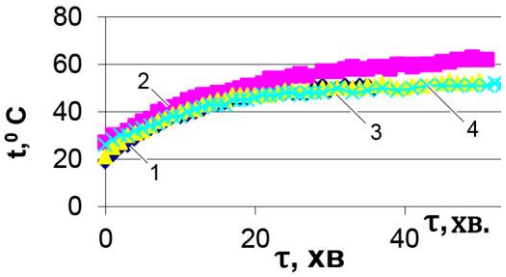


Рис. 29. Термограми інфрачервоного сушіння для ріпаку при $N_в$=100Вт: 1 – 100 г; 2 – 200 г; 3– 300 г; 4 – 400 г.

Дослідження інноваційного методу сушіння із застосуванням ІЧ та НВЧ опромінення в рухомому шарі проведено в широкому діапазоні експериментальних даних (табл. 5) на дослідній установці рис. 27б.

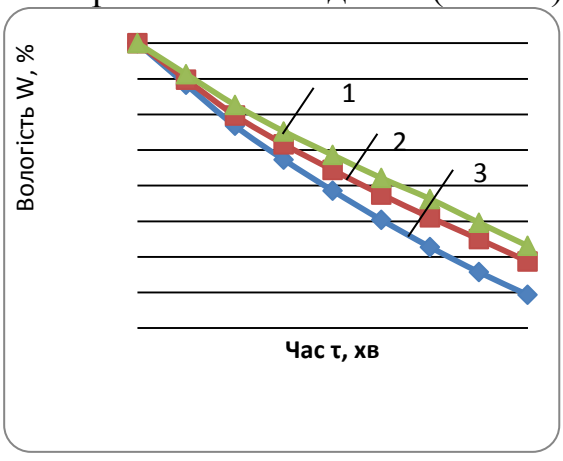


Рис. 30. Вплив питомої потужності НВЧ генераторів на кінетику сушіння соняшнику: 1 – N = 7,5 кВт/м^2; 2 – N = 11,25 кВт/м^2; 3 – N = 15 кВт/м^2.

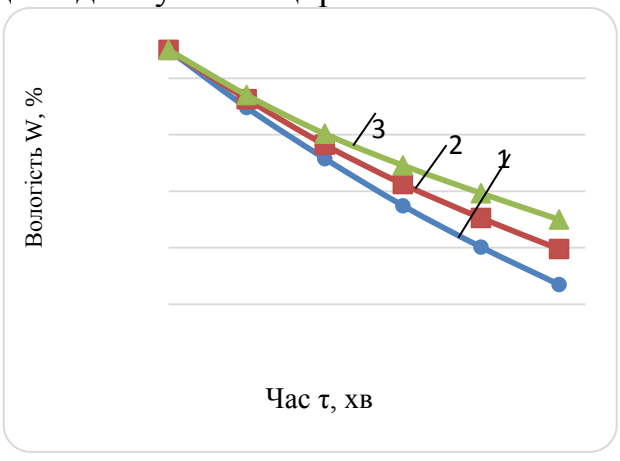


Рис. 31. Вплив питомої потужності НВЧгенераторів на кінетику сушіння сої: 1 – N = 15 кВт/м^2; 2 – N = 10,5 кВт/м^2; 3 – N = 7,5 кВт/м^2.

Збільшення НВЧ - модулів підвищує тривалість перебування продукту під дією випромінювання. Це дозволяє використовувати більш високу швидкість руху продукту, що призводить до підвищення продуктивності установки. Досліди проводились з використанням одного, двох та трьох НВЧ- модулів при швидкості руху продукту 0,025 м/с, завантаження

3,96кг/м^2 і підведеною питомою потужністю кожного модуля 9,17 кВт/м^2 (рис.32).

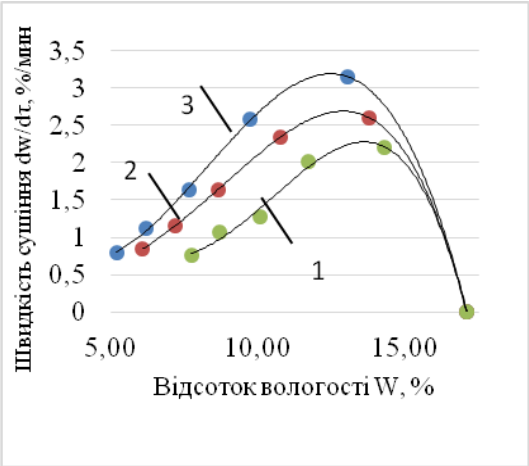


Рис. 32. Вплив кількості НВЧ – модулів на швидкість сушіння соняшнику: 1 – N = 15 кВт/м^2; 2 – N = 30 кВт/м^2; 3 – N = 45 кВт/м^2.

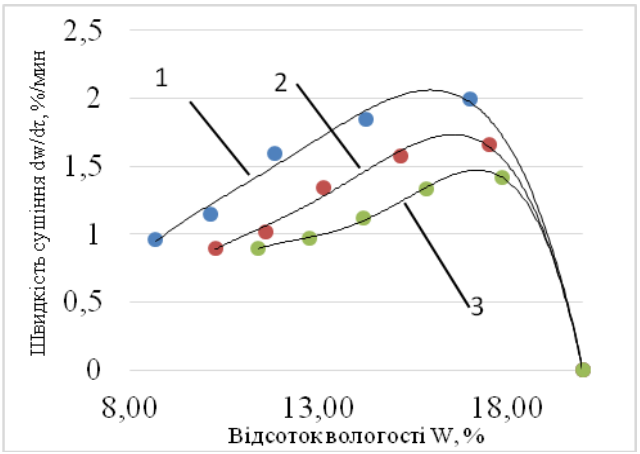


Рис. 33. Вплив кількості НВЧ – модулів на швидкість сушіння сої:1 – N = 45 кВт/м^2; 2 – N = 30 кВт/м^2; 3 – N = 15 кВт/м^2.

Проведені аналогічні дослідження із застосування ІЧ генераторів опромінення насіння соняшнику та сої.

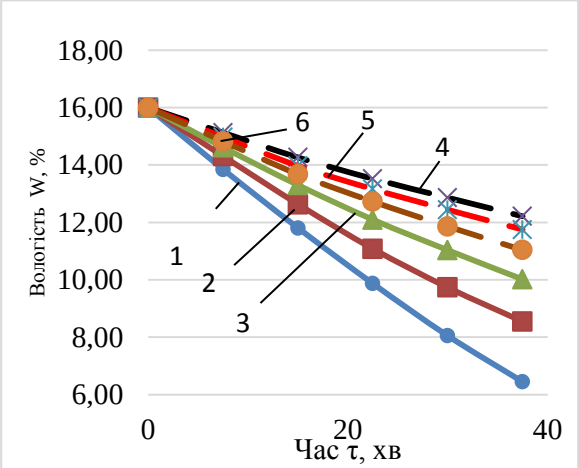


Рис.34. Вплив питомої потужності та типу підведеної енергії на кінетику сушіння соняшнику:ІЧ:1 – N = 11 кВт/м^2; 2 – N = 9,17 кВт/м^2; 3 – N = 7,33 кВт/м^2; НВЧ: 4 – N = 7,5 кВт/м^2; 5 – N = 11,25 кВт/м^2; 6 – N = 15 кВт/м^2.

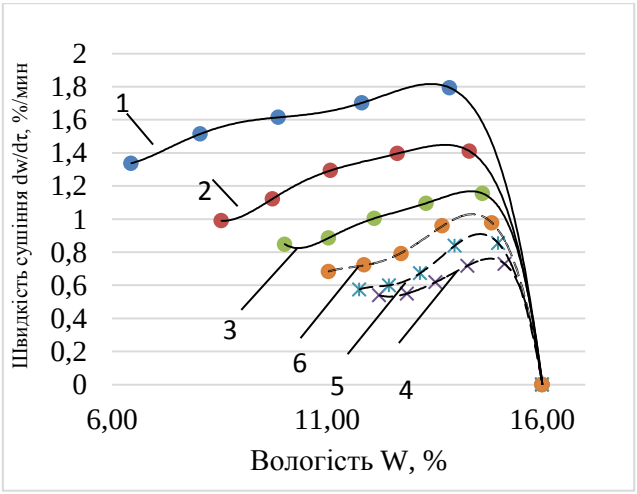


Рис. 35. Вплив типу підведеної енергії та питомої потужності на швидкість сушіння соняшника:ІЧ: 1 – N = 11 кВт/м^2; 2 – N = 9,17 кВт/м^2; 3 – N = 7,33 кВт/м^2; НВЧ: 4 – N = 7,5 кВт/м^2; 5 – N = 11,25 кВт/м^2; 6 – N = 15 кВт/м^2.

При сушінні соняшника (рис. 34), тип підведеної енергії значно впливає на процес сушіння, підведення потужності у 11 кВт/м^2 при ІЧ-випроміненні у 2,5 раза швидше видаляє вологу, ніж при використанні НВЧ-випромінення з потужністю у 11,25 кВт/м^2. При підводі ІЧ-випромінення швидкість сушіння у 1,8 раза більша ніж при використанні НВЧ-випромінення, і становить 1,35…1,8 %/хв та 0,68…1%/хв відповідно. Також, при зменшених потужностях підведеної енергії при ІЧ-випроміненні у 1,5 раза, швидкість сушіння зменшиться у 1,3 разай становитиме 0,83…1,18 %/хв.

Крім того, вплив на кінетику сушіння соняшника (рис. 36) типу підведеної енергії досить великий. НВЧ-генератори енергії дали кращий результат лише у порівнянні з використанням одного модуля з ІЧ-випромінювачем енергії.

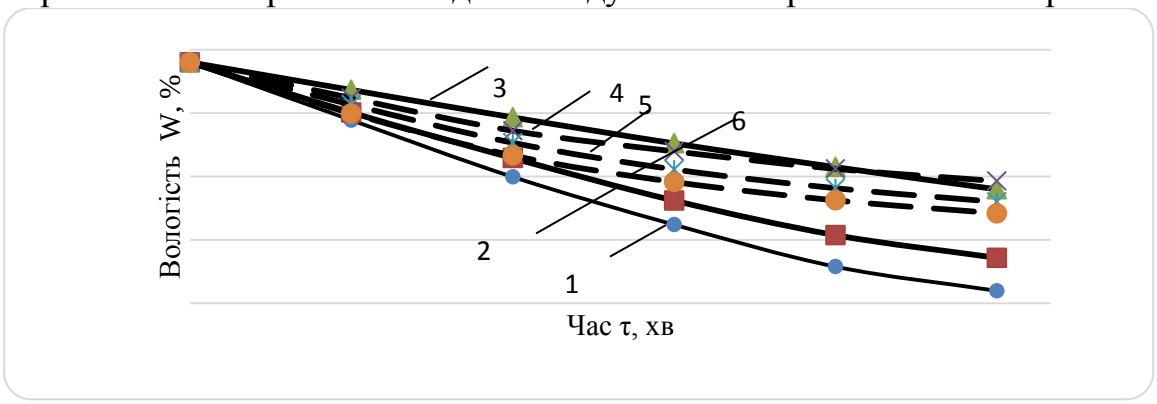


Рис.36. Вплив типу підведеної енергії та кількості джерел енергії на кінетику сушіння соняшнику: при ІЧ 1 – N = 27,51 кВт/м^2; 2 – N = 18,34 кВт/м^2; 3 – N = 9,17 кВт/м^2; при НВЧ 4 – N = 15 кВт/м^2; 5 – N = 30 кВт/м^2; 6 – N = 45 кВт/м^2.

В результаті обробки бази експериментальних даних методами теорії подібності отримано критеріальну модель, що стала основою блок-схеми розрахунку кінетики масоперенесення (рис.37).

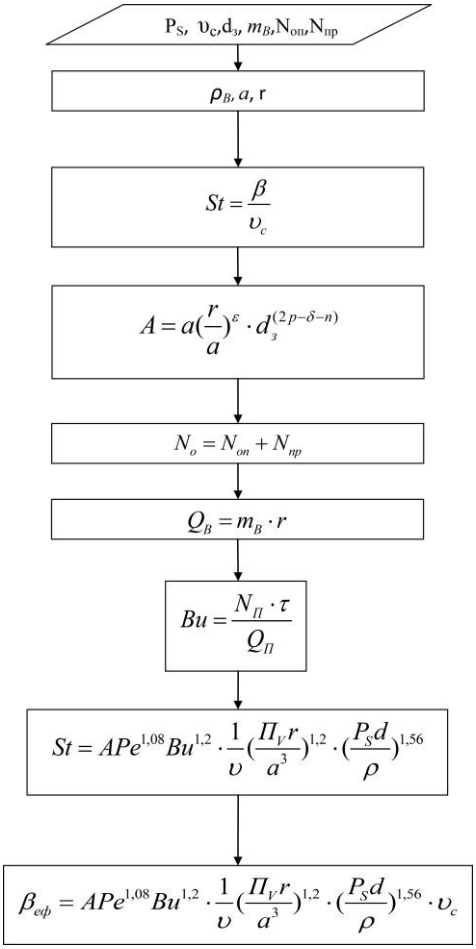


Рис.37. Блок схема розрахунку кінетики масоперенесенняпри сушінні

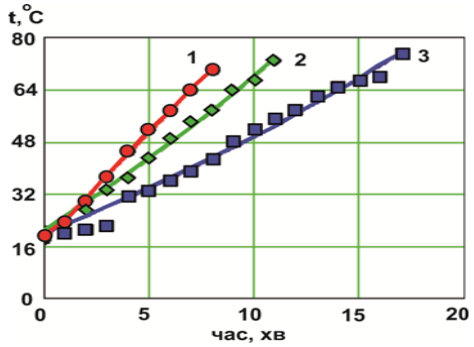


Рис. 38. Термограми сушіння насіння ріпаку при ІЧ- енергопідводі (експериментальні дані і криві поліноміальних регресій), Р=320Вт : 1 – 100г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

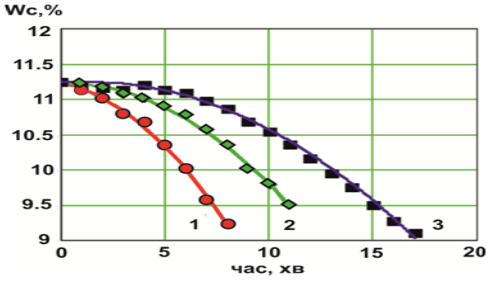


Рис. 39. Зміна вологості насіння ріпакупри ІЧ- енергопідводі, Р=320 Вт: 1 – 100г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

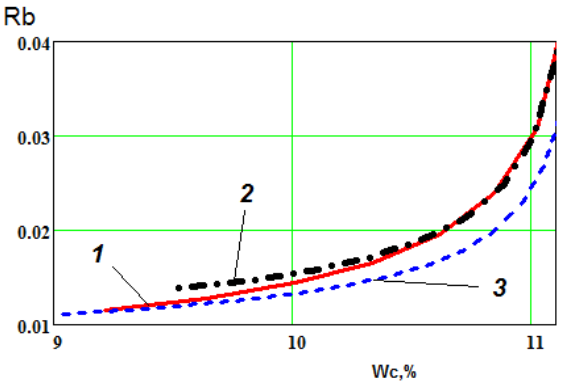


Рис.40. Залежність критерію Ребіндера від вологості матеріалу, P=320Вт : 1 – 100г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

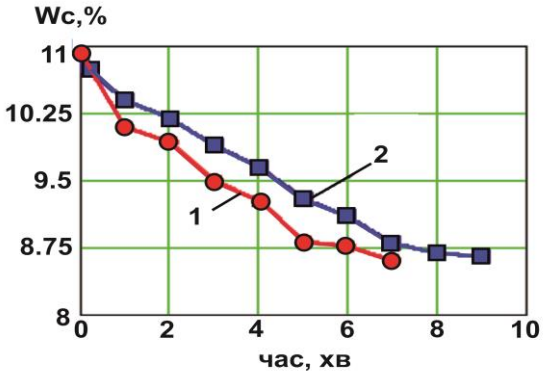


Рис.41. Зміна вологості зерна в рухомому шарі: 1–P=500Вт, 2 – P=400Вт.

Отримана база експериментальних даних використана для перевірки адекватності моделей (33 та 34). При цьому, для реалізації моделей (33 та 34) закладений розрахунок кінетичних коефіцієнтів масоперенесення за визначеними експериментально залежностями. В умовах рухомого шару при наявності ІЧ-опромінення і вібрацій дуже складно визначити температуру й вологовміст матеріалу. Тому визначались кінцеві параметри температури й вологовмісту зерна на виході сушарки, при різній експозиції теплової обробки. Експериментальні дані апроксимувались поліномами другого порядку, графічна інтерпретація експериментальних даних і розрахункових кривих залежності зміни температури й вологовмісту представлені на рис. 38 і рис. 39.

Для визначення числа Ребіндера експерименти проводились в періодичному режимі сушіння, а зміна температури й маси фіксувалася в режимі реального часу, залежність зміни числа Ребіндера від вологи матеріалу представлена на рис. 40. Значення числа Ребіндера при зменшенні вологовмісту зерна теж зменшується, це свідчить про те, що зі збільшенням вологовмісту зерноматеріалу питомі витрати теплоти на випаровування вологи теж збільшуються.

Зміна вологовмісту матеріалу в часі (крива сушіння) при роботі сушарки в безперервному режимі визначалась за методикою послідовного накладання експериментів, тобто фіксувалась зміна вологості при роботі сушарки за певний період часу.

Результати експериментів представлено графіками зміни вологості ріпаку в часі на рис.41(в рухомому шарі).

В цьому випадку аналітичну залежність можна використати для ідентифікації математичних моделей, шляхом її порівняння з експериментальними даними.

Використовуючи алгоритм Левенберга-Маркварда та методику параметричної ідентифікації нагрівальних установок, визначено основні параметричні комплекси моделей (45) і (48), а саме, за отриманими даними розраховані зміна параметрів $\theta(\tau)$і $U(\tau)$ процесу в часі, тобто криві кінетики нагріву і сушіння рис.42.

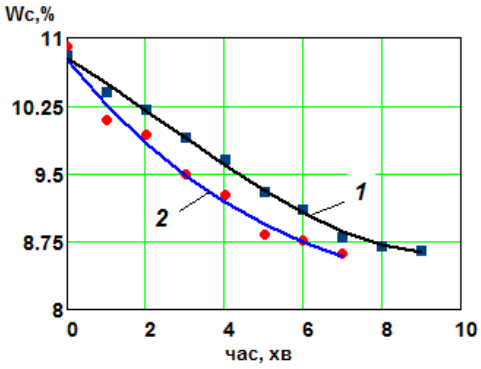


Рис.42. Експериментальні дані сушіння насіння ріпаку і розрахункові криві:
1–P=400Вт, 2 – P=500 Вт.

Особливістю і цінністю наведеної моделі є те, що вона встановлює закономірності теплової й матеріальної взаємодії між усіма об'єктами сушіння. Наведений наближений аналітичний розв'язок представленої моделі дозволяє: наближено визначати поля температури й вологовмісту зернового матеріалу в часі й за координатою в напрямку переміщення; провести визначення і уточнення параметричних комплексів моделі за емпіричними залежностями кінетики нагріву і зневоднення насіння; надалі використовувати дану модель для синтезу системи оптимального управління процесом.

У **дев'ятому розділі** «Інженерні методики розрахунку та оптимізації інноваційних розробок екстракторів» використано теоретичні основи розділу 4 та критеріальні моделі (49 - 52) розділу 6. Інженерну методику у вигляді узагальненої структури блок-схеми наведено на (рис. 43). Крім того, була проведена серія експериментів для визначення енергетичних показників екстрактора із мікрохвильовим інтенсифікатором. Експериментально визначались залежності питомої потужності (j) від потужності поля (N) та гідромодуля (рис.44, 45). У системах «соя, ріпак – етиловий спирт, гексан» було досліджено зміну концентрації цільового компонента в рідкій і твердій фазі в часі за значень гідромодуля, рівних 1:3…1:7, та за різних значень потужності мікрохвильового випромінювача екстрактора: 1,6 кВт, 0,8 кВт, 0,4 кВт. Досліджено залежність питомого енергоспоживання перенесеної речовини від гідромодуля за різних значень потужності НВЧ випромінювача та залежність питомого енергоспоживання від питомої потужності НВЧ випромінювача за різних значень гідромодуля (рис.44, 45) для різних розчинників.

У результаті було встановлено, що у використанні етилового спирту як розчинника, збільшення гідромодуля призводить до збільшення питомого енергоспоживання та уповільнення процесу. Тому рекомендованим є значення гідромодуля 1:3. Якщо як розчинник використовується гексан, то збільшення гідромодуля призводить до незначного зниження питомого енергоспоживання.

Це пов'язано з тим, що вплив гідромодуля на коефіцієнт масовіддачі при екстрагуванні гексаном проявляється сильніше, ніж при екстрагуванні спиртом, де основний вплив має число енергетичної дії, число Бурдо. Зменшення потужності випромінювання призводить до зниження питомого енергоспоживання при використанні в якості екстрагента як спирту, так і гексану, але водночас відбувається збільшення часу процесу і, відповідно до збільшення екстрактивних речовин. Тому доцільне значення потужності НВЧ випромінювання рекомендовано визначати для конкретних умов за

комплексними економічними критеріями, що враховують капітальні та експлуатаційні витрати з відповідними ваговими коефіцієнтами.

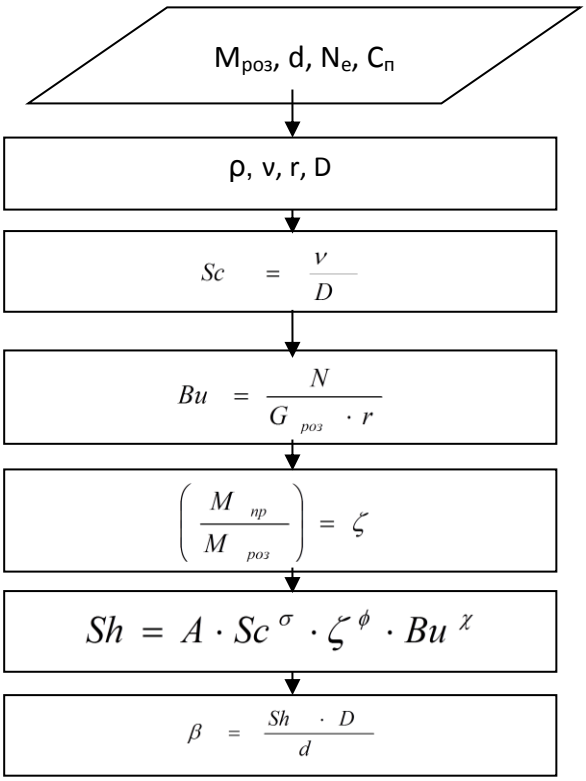


Рис. 43. Блок схема розрахунку кінетики масоперенесення в процесі екстрагування

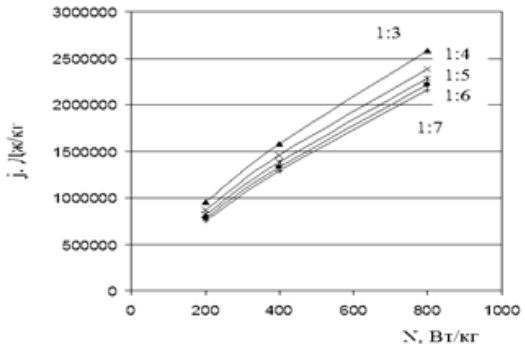


Рис. 44. Залежність j від N (ріпак- етанол)

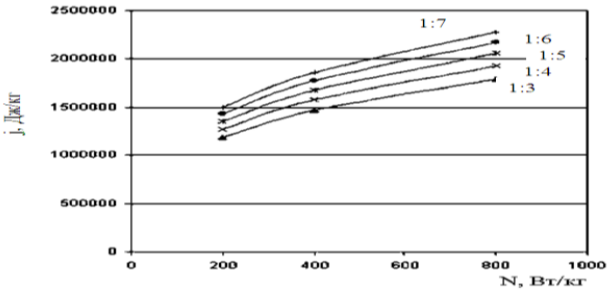


Рис. 45. Залежність j від N (ріпак- гексан)

Проведено апробацію моделі (17). Замість Bi_m комплекс $\frac{\beta R}{D_{ef}}$ і визначені таким чином залежності μ_1–μ_5 підставимо в залежність (17). За допомогою вбудованої функції genfit у математичному пакеті Mathcad, що реалізовує алгоритм Левенберга-Маквардта, визначимо значення q_m, β, D_{ef} при яких залежність (17) буде найбільш точно описувати набір визначених масивів даних.

На рис. 46 представлені точки визначені за емпіричною залежністю і криві отримані за аналітичною залежністю (17) (q_m, β, D_{ef} визначені функцією genfit в Mathcad).

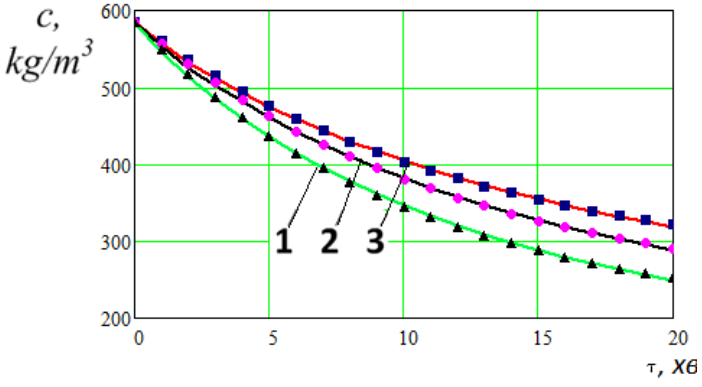


Рис. 46. Зміна концентрації макухи ріпаку при екстракції в спирті з потужністю мікрохвильового генератора: 1 – 127 Вт; 2 – 225 Вт; 3 – 425 Вт (■, ●, ▲ – емпіричні точки і аналітичні криві отримані за залежністю (22) та ідентифікованими коефіцієнтами).

Отримані у розділі методики можна використовувати для оптимізації екстракційних апаратів із мікрохвильовими інтенсифікаторами.

У **десятому розділі «**Економічне обґрунтування, практичні рекомендації та впровадження інноваційних проектів у виробництво**»** наведено схеми й опис конструкцій обладнання і технологічних схем, запропонованих автором до реалізації в промисловості та проведено економічне обґрунтування.

У додатках подано описи лабораторних установок, на яких проводились дослідження, зведені табличні дані та графічні залежності теоретичних та експериментальних досліджень процесів сушіння та екстрагування. Наведено протоколи аналізу якості виробленої продукції, акти виробничих випробувань, впроваджень на підприємствах, патенти.

ВИСНОВКИ

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень в роботі обґрунтовано та доведено наукову гіпотезу «адресної» доставки енергії до вологого матеріалу шляхом механічних та електромагнітних інтенсифікаторів, що надає можливості створення енергоефективного обладнання:

1. Методами енергетичного моніторингу встановлено, що технології основних операцій переробки олійного насіння та виготовлення олії, сушіння й екстрагування відрізняються високою енергоємністю. Виявлено, що існуючі методи інтенсифікації процесів конвективного підведення енергії до об’єкту обробки практично вичерпано. Встановлено, що суттєвого підвищення технологічної та енергетичної ефективності в процесах, що розглядаються, можна досягти інтенсифікацією бародифузійного потоку у колоїдному капілярно-пористому матеріалі «адресною» доставкою енергії ІЧ та НВЧ опроміненням, що зумовило проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень.

2. Розроблено фізичні та математичні моделі, що дозволили розширити уявлення про масообмін в процесах сушіння та екстрагування, які увійшли в основу методик розрахунку удосконалених теплотехнології, а саме:

– методики розрахунку і оптимізації процесів екстрагування в умовах адресної мікрохвильової доставки енергії. Отримані наближені розв’язки наведених теоретичних фізичних та математичних моделей для періодичного та безперервного процесу дозволили ідентифікувати процеси масопереносу в екстракторах з МХ підведенням енергії для подальшого визначення режимів функціонування екстракторів з точки зору енергоефективності їх роботи;

– методики розрахунку і оптимізації процесу у вібраційних сушарках періодичної та безперервної дії з ІЧ та МХ підведенням енергії. Отримано аналітичний розв’язок спрощених рівнянь, а також формули для розрахунку процесу сушіння в періодичному і безперевному режимах дозволяють розрахувати коефіцієнти і константи рівнянь процесів переносу теплоти і маси за даними натурних експериментів.

3. Для уточнення запропонованих моделей створені експериментальні установки і проведені комплексні дослідження процесів масообміну при:

– екстрагування олієвмісної сировини ріпаку та сої. Запропоновано уточнену залежність для визначення коефіцієнтів масообміну. Доведено, що значний вплив на значення коефіцієнту масовіддачі має потужність мікрохвильового поля. Підвищення потужності МХП в 1,2…1,5 рази приводить до збільшення виходу екстрагованої олії розчинником спиртом на 18 %. Число пароутворення, яке виражає співвідношення потужності мікрохвильового поля та потужності, що необхідна для перетворення всієї рідини в пару, враховує вплив МХП на інтенсивність екстрагування та узгоджує масив експериментальних даних, із похибкою 16,5 %;

– сушінні олійного насіння в вібраційній ІЧ-сушарці періодичної та безперервної дії. Одночасне підключення хвильових полів (вібраційних та електромагнітних) інтенсифікує процес. Запропоновані рівняння для визначення тривалості сушіння. Встановлено, що число Ребіндера, яке характеризує вологотеплові характеристики матеріалу, зменшується при зменшенні вологості насіння з величини 0,04 при 11% до 0,01 при 9%. Це обґрунтовано свідчить про те, що із збільшенням вологовмісту матеріалу питомі витрати теплоти на випаровування вологи також збільшуються. Інтенсивність масовіддачі визначається запропонованими модифікованими вібраційними числами Стантона, Пеклє та числом енергетичної дії Бурдо, які враховували параметри вібрації – частоту коливань та завантаження. Масив експериментальних даних узгоджується з похибкою 5,8…9,12%.

4. Розроблено інженерні методи розрахунку обладнання для сушіння та екстрагування олійного насіння соняшнику, ріпаку та сої з використанням методів адресної доставки енергії за допомогою інфрачервоного та мікрохвильового підведення енергії. Розроблено методики і створено алгоритм для розрахунку і оптимізації обладнання для сушіння насіння. Розроблено методики і створено алгоритм для розрахунку екстракторів з безградієнтною доставкою енергії за рахунок МХ випромінювання.

5. Встановлено, що під дією мікрохвильового опромінення значення коефіцієнта масовіддачі при екстрагуванні олієвмісної сировини на порядок збільшується ($\beta=1\cdot10^{-5}$) в порівнянні з екстрагуванням без впливу МХ поля ($\beta=1\cdot10^{-6}$). Вилучення олії під дією мікрохвильового поля збільшується на 30%, а витрати електроенергії зменшуються в рази. Встановлено доцільні режимні параметри: гідромодуль – 1:3 – 1:4; ступінь подрібнення – 0,5 – 1 мм; тривалість процесу – 15 – 30 хв.; питома потужність – 8 – 10,2 кВт/кг сировини; рекомендований розчинник для екстрагування в МХ полі – етиловий спирт, як полярний, безпечний, нетоксичний та інтенсивніший у 1,5 рази, ніж гексан в середовищі впливу мікрохвильового поля.

6. Встановлено, що під час сушінні соняшника, тип підведеної енергії значно впливає на процес сушіння, підведення потужності у 11 кВт/м^2 при ІЧ-випромінюванні у 2,5 рази швидше видаляє вологу ніж при використанні НВЧ-випромінювання з потужністю у 11,25 кВт/м^2.

Експериментально встановлено, що збільшення питомого завантаження ріпаку до 3,5 кг/м^2 призводить до збільшення виходу вологи, а наступне збільшення питомого завантаження є недоцільним, внаслідок недостатньої

проникності ІЧ променів всередину всього шару продукту.

7. Результати промислових випробовувань інноваційної сушарки показали можливість використання розробленого обладнання для фермерських господарств та на підприємствах олійно-екстракційного виробництва. Питомі витрати на 1 кг видаленої вологи інноваційної стрічкової сушарки в електромагнітному полі майже у 3 рази менші за середні показники в Україні. Спроектовані експериментально-промислові моделі машин з ІЧ інтенсифікатором були впроваджені на ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат», ТОВ-Підприємство «АВІС» та ТОВ «Україна+».

8. Розроблено комплект робочої конструкторської документації на дослідний зразок екстрактора з МХ інтенсифікатором. Порівняльна характеристика проекту екстрактора з мікрохвильовим інтенсифікатором з екстрактором, що працює з використанням зрідженого діоксину вуглецю в області тисків до 40 МПа показала, що питомі витрати енергії на 1кг олії в розробленому екстракторі майже в 3 рази менші ніж у промисловому екстракторі УЕЛ-1. Впровадження екстрактору з МХ інтенсифікатором проведено на ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат». Проведені дослідження дослідно-промислового зразка екстракційної установки з адресною доставкою енергії і наступний аналіз продукту в лабораторії ПАТ «Вінницький олійножировий комбінат» показали, що отриманий екстракт відповідає вимогам діючих державних стандартів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. **Друкований М.Ф., Бандура В.М., Коляновська Л.М., Паламарчук В.І.** Удосконалення теплотехнології при виробництві олії та біодизельного пального: монографія. Вінниця, РВВ ВНАУ, 2014. 254 с. *(Особистий внесок: розділ 2 та 3 написані особисто автором)*

Статті у виданнях, які входять до наукометричної бази даних SCOPUS та Web of Science

2. **Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E**. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eaestern-European Jurnal of Enterprise Tehnologies.*Vol.4, №11 (88). 2017. Technology and Equipment of Food Production, P.34-42*(Особистий внесок: проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, в співавторстві розроблено математичну модель).*

3. **Oleg Burdo, Valentyna Bandura, Ludmyla Kolianovska, Ilmars Dukulis.** Experimental Research of oil exstraction from canola by using microwave technology. *16th International Scientific Conference Engineering for rural development*. Proceedings. Vol.16, May 24-26. 2017. Jelgava, Latvia. P.296-303 (*Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

4. **Bandura V., Mazur V., Yaroshenko L., Rubanenko O**. Research on sunflower seeds drying process in a monolayer tray vibration dryer based on infrared radiation. *INMATEH–Agricultural Engineering.* Vol. 57, №. 1. 2019. P.233-242. (*Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

5. **Burdo O., Bezbah I., Kepin N., Zykov A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura V., Mazurenco I.** Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical

treatmentand dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.5, №11(101). 2019. P. 24-32. (*Особистий внесок:проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз)*

6. **Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O.** Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2018. 54(2).P. 210-218*(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

7. **Kotov B., Bandura V.**Construction of a mathematical model of extraction process in the system solid body liquid in a microwave field.*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. 5 (6-95). P. 33-43*(Особистий внесок: проведено літературний пошук, підготована стаття до друку.)*

8. **Bulgakov V., Bandura V., Arak M., Olt J.** Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. *Agronomy Research*. 2018. 16(2). P. 349-356. *(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

9. **Bandura V., Bulgakov V., Adamchuk V., Ivanovs S.** Investigation of oil extraction from the canola and soybean seeds, using a microwave intensifier. *INMATEH–Agricultural Engineering.* 2018. 55(2). P. 45-52 *(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

10. **BanduraV., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A.**Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with ir-energy supply. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. 4(8-94). P. 50-58. *(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

11. **Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O.** Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH–Agricultural Engineering.* 2018. 54(1). P.95-104.*(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

12**.Burdo O. G., Buiwol S. M., Bandura V.N.**Power strategy of the agriculture development in the conditions of crisis. *Problemele Energeticii Regionale*, 2009.Vol. 1 C. 1-7. *(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз.)*

13. **Burdo O.G., Terziev S.G., Bandura V.N.** Principles Of Directed Energy Action In Food Nanotechnologies. *Problemele Energeticii Regionale*, 2015, V.1. C. 79-86. *(Особистий внесок: проведено літературний пошук, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.)*

Статті у фахових виданнях України

14. **Бандура В.М.** Аспекти використання рослинної олії при виробництві біодизельного пального. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. Одеса, 2008. Вип. 30. С.161-166.

15.**Друкований М.Ф., Бандура В.М., ПаламарчукВ.І.** Апарати для переробки олії в біодизель. *Збірник наукових праць ВДАУ*. 2009. № 2. С. 69-73. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

16. **Светлічний П. І., Буйвол С. М., Бандура В. М.** Підвищення ефективності технології виробництва біопалива. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. 2009. Вип. 35. С. 256–259.

17. **Бандура В. М., Буйвол С. М.** Дослідження кінетики екстрагування при переробці рослинної сировини в біопаливо. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4 (60). С. 98–100. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

18. **Бандура В.М.** Розвиток альтернативної енергетики в Україні та світі.*Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 37. 2010. С. 267-271.

19. **Буйвол С.М., Светлічний П.І., Саламаха В.І., Бандура В.М.** Інтенсифікація екстрагування олії із шроту ріпаку. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. Вип. 37, 2010. С.193-196. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

20. **Бурдо О. Г., Буйвол С. М., Бандура В. М.** Кінетика процесу екстрагування в електромагнітному полі/ *ОНАХТ*. – Вип. 38, т. 2., Одеса – 2010. – С. 330–333. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

21.**Коляновська Л.М., Бандура В.М.** Вплив електромагнітного поля на екстрагування олії із насіння сої. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2010. Вип.5. Том 3. С.7-11. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*)

22. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Інтенсифікація екстрагування рослинних олій електромагнітним полем. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 39, Том 2. 2011. С.186-190. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

23. **Бандура В.М.** Енергоефективні технологічні процеси переробки олійних культур. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 39, Том 2, 2011. С.234-240.

24. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Вплив мікрохвильового поля інверторної та імпульсної дії на інтенсифікування екстрагування олії рослинної сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*.Вип.11.Том 6., 2011.С.212-218. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

25. **Бандура В.М.** Перспективи комбінованих методів переробки олійних культур. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Вип. 8. Серія: Технічні науки. 2011. С.32-36.

26. **Бандура В.М**., **Коляновська Л.М., Ружицька Н.В.** Інтенсифікація екстрагування в технології виробництва ріпакової олії. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №1 (61). С.102-105. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

27. **Бандура В.М., Марчак Т.В., Романов М.О., Жегалюк О.В.** Аналіз методів екстрагування для збільшення кількості та підвищення якості олії, вилученої з олійного насіння. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2011. №1 (61).С.106-109. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

28. **Друкований М.Ф.,Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Вібраційна технологія очистки олії від мила при виробництві біодизелю. *Вібрації в техніці та технологіях*. №1(61). 2011. С.114-120. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

29. **Бандура В.М., КоляновськаЛ.М.** Комплексна переробка ріпаку з отриманням олії та біодизелю. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. 2011. Вип.40. Том1. С.244-248. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

30. **Бандура В.М., Романов М.О., Ружицька Н.М.** Перспективи методу сушіння олійних культур з використанням інфрачервоного опромінення. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Вип. 8. Серія: Технічні науки. 2011. С.32-36. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

31. **Бурдо О.Г., Бандура В.М., Яровий И.И.** Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии.Наукові праці ОНАХТ. Вип. 39, Том 2, 2011. С.38-44. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

32. **Чубик Р. В.,Зозуляк І. А., Бандура В. М.** Електромеханічна модель адаптивної резонансної двохконтейнерної вібраційної сушарки. *Вібрації в техніці та технологіях*.

2012. № 1 (65). С.102–108. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

33. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Кінетика екстрагування олії із сої та ріпаку. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 41, Том 2, 2012. С.101-106. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

34. **Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В., Яровой И.И.** Энергетика пищевых нанотехнологий. *Щоквартальний науково-практичний журнал. «Інтегровані технології та енергозбереження»*. 2012. №3. С.11-15.*(Особистий внесок: розроблення методології та проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів*).

35. **Бандура В.М.** Аналіз схем технологічних ліній для переробки насіння сої. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 41, Том 2, 2012. С.186-189.

36. **Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Експериментальні дослідження кінетики сушіння ріпаку та сої в нерухомому шарі в інфрачервоному полі. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 41. Том 2. 2012. С. 110-113.*(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

37. **Бандура В. М., Друкований М. Ф., Зозуляк І. А.** Обоснование конструкции вибрационной сушилки для подсолнечника.*Харчова наука і технологія: наук.-виробн. журн*. 2012. № 3 (20). С.91–94. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

38. **Коляновська Л.М., Бандура В.М.** Вплив електромагнітного поля на екстрагування олії із насіння сої. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Технічні науки. Вип.10. Том.1 (58). 2012. С.137-141. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

39. **Паламарчук І.П., Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвеєрної вібраційної сушарки. *Вібрації в техніці та технологіях*. №2(66). 2012 С.116-125. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

40. **Буйвол С.М., Бурдо О.Г., Бандура В.М** Дослідження процесу екстрагування із використанням мікрохвильового поля. *Харчова наука і технологія:наук.-виробн. журнал.* № 1(18)* березень. 2012. С.115-118. *(Особистий внесок: розроблення методології та проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів*).

41. **Коляновська Л.М., Бандура В.М., Жегалюк О.В.** Застосування теорії подібності в моделюванні процесу екстрагування під впливом мікрохвильового поля. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Технічні науки. Вип.11 Том.1 (65). 2012. С.272-275. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

42. **Бандура В.М.** Оптимізація процесу сушіння насіння ріпаку в інфрачервоному полі. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Технічні науки. Вип.11. Том.2(66). 2012. С.343-346.

43. **Терзієв С.Г., Ружицька Н.В., Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Кінетика та статика екстрагування олії з відходів харчових виробництв. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип.42. Том1. 2012. С.344-348. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

44. **Бурдо О.Г., Бандура В.М., Ружицька Н.В., Макієвська Т.Л.** Енергетичні аспекти харчових нанотехнологій. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 42(2). Том 2. 2012. С.462 – 467. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

45. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Інтенсифікація масоперенесення в екстрагуванні рослинних олій. *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал*. .№2.2013. С.144-147. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

46. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Обробка експериментальних даних процесу екстрагування рослинних олій мікрохвильовим полем. *Збірник наукових праць ОНАХТ*.

Вип.43. Том2. 2013.С.66-69. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

47. **Бандура В.М, Коляновська Л.М.** Розробка алгоритму розрахунку екстрактора з електромагнітним інтенсифікатором. *Наукові праці НУХТ*. №52. 2013. С. 62– 68. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

48. **Бандура В.М.,КоляновськаЛ.М.** Розробка технологічної схеми екстрагування олії з допомогою мікрохвильового інтенсифікатора. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. Вип.45. Том3. 2014.С.39-42. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

49. **Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В.** Принципы адресного подвода энергии при переработке пищевого сырья. *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал.* №4.2014. С.79-85. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

50. **Бандура В.М., Бережнюк Д. П.** Енергоаудит як засіб енергоощадження в технологіях переробки олієвмісних культур. *Наукові праці НУХТ*. Т. 20. № 3. 2014.С. 170 –174 *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

51. **Bandura V., Zozuliak I., Palamarchuk V.** Description of heat exchange in the similarity the ory of vibrating drying process of sunflower. *Ukrainian Journal of Food Science.*Vol.2.Issue 2. 2014. P.305-311. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

52. **Власенко В.В., Бандура В.М., Коляновська Л.М.**Теорія подібності як спосіб моделювання процесу екстрагування під впливом мікрохвильового поля. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Серія: Технічні науки. Вип.1. 2015. С.83-88. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

53. **Бандура В.М.**Обґрунтування ІЧ-обробки насіння соняшника перед його обрушуванням. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. Вип.47. Том2. 2015. С.131-133.

54. **Бандура В.М., Зозуляк І.А., Зозуляк О.В.**Моделювання процесу вібраційного сушіння соняшнику при використанні теорії подібності. *Збірник наукових праць ОНАХТ*. Вип.47. Том1. 2015. С.94–99. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

55. **Бурдо О.Г., Бандура В. Н., Яровой И. И.** Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип.39. Том 2. 2015. С. 38-43. *(Особистий внесок:, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

56. **Бандура В.М.** Перспективи застосування інфрачервоного та мікрохвильового поля в процесі переробки олійних культур. *Техніка,енергетика, транспорт АПК*. 2016. С.94-101.

57. **Левтринская Ю.О., Ружицкая Н.В., Резниченко Т.А., Бандура В.Н.** Микроволновые технологи интенсификации массообменных и тепловых процессов при переработке растительного сырья.*Наукові праці ОНАХТ*. Вип.1. Том 80. 2016. С.67-73.*(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

58. **Бандура В.М., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О.** Енергетичний моніторинг олійного виробництва. *Наукові праці, ОНАХТ*. Вип.1, Том 81. 2017. С.39 – 44. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

59. **Бандура В.М., Маренченко О.І., Пилипенко Є.О.** Сушіння насіння соняшнику в електромагнітному полі. *Техніка енергетика транспорт АПК*. №3 (98). 2017. С.63-68. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

60. **Бандура В.М., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О., Катасонов О.В.** Кінетика сушіння олійної сировини в електромагнітному полі. *Наукові праці, ОНАХТ*. Вип.1. Том 81. 2017. С.94-99. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

61. **Котов Б.І., Бандура В.М., Калініченко Р.А.** Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти. *Енергетика і автоматика.* №6. 2018. С.35 – 50. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

62. **Бандура В. М., Яровий І.І., Маренченко О. І., Пилипенко Є.О.** Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 2. Том 82. 2018. С.123-129. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

63. **Бандура В.М., Котов Б.І., Гріщенко В.О.** Моделювання та розрахунок процесу радіаційно-конвективного сушіння насіння у лотковій вібраційній установці періодичної дії (з контуром циркуляції матеріалу). *Вісник ХНТУСГ*. Вип.199. 2019. С.84–94. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

64. **Бандура В.М., Ярошенко Л.В.** Обґрунтування параметрів процесу сушіння насіння соняшнику у вібросушарці на основі інфрачервоного опромінення. *Наукові праці ОНАХТ*. Вип. 1. Том 83. 2019. С.110-116. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

Патенти України

65. Адаптивний пристрій для сушіння матеріалу у віброкиплячому шарі: пат. на корисну модель 80207 України, МПК F26B 17/26. / **Чубик Р. В., Зозуляк І. А., Бандура В. М., Зозуляк О. В.**; заявник та патентовласник Вінн. нац. агр. ун.-т. – № 2012 02646 ; заявл. 05.03.2012 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.

66. Вібраційна конвеєрна сушарка з інфрачервоними випромінювачами: пат. на корисну модель 87767 України. **Паламарчук І.П., Бандура В.М., Паламарчук В.І.**; заявл. 28.02.2013; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. — 4 с.

67. Спосіб одержання ріпакової олії: пат. на корисну модель №86703 України. **Бурдо О.Г., Бандура В.М., Ружицька Н.В., Коляновська Л.М.**; №2013 07975; заявл. 25.06.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. 4 с.

68. Інфрачервона сушарка: пат.на корисну модель №109560 Україна (2016) F26B 17/02,F26B 3/30, B02B 7/00./ **Бандура В.М., Любін М.В., Янович В.П.;** заявник і власник В.М.Бандура – № u 201602403; заявл.12.03.2016, опубл. 25.08.2016, Бюл.№16.–4с.

69. Установка для очистки біодизельного пального від метанолу: пат. на корисну модель №48304 Україна. /**Друкований М.Ф., Сімончук С.І., Кухар С.І., Кубляк Ю.І., Бандура В.М., Друкований О.М.** ;заявл.08.10. 2019 опубл.10.03. 2010 Бюл.5. 4с.

70. Керований вібропривод напрямленої дії зі спареними дебалансами: патент на винахід № 116418 Україна./ **Чубик Р. В., Ярошенко Л. В., Бандура В. М., Томчук В. В., Зрайло Н. М.** ;заяв.12.03.2016р. опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5. 10с

71. Вібраційна сушарка з інфрачервоними випромінювачами: пат. України на винахід №1191102. **Ярошенко Л.В., Бандура В.М.**; заявл. 25.09.2017. опубл. 25 04.2019, Бюл.№8. 7с.

Публікації в матеріалах міжнародних конференцій

72. **Бурдо. О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н., Яровой И.И.** Механодиффузионный эффект – новое явление в тепломассопереносе. *Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF-XV*.May 23-26. 2016 С.224-228. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

73. **Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.**Режимы обезвоживания в электромагнитном поле. *В сборнике: Актуальные проблемы сушки и термовлажностной*

обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. Минск, 2015. С. 47-55. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

74. **Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Яровой И.И.** Нанотехнологические инновации в процессах сушки. *В сборнике: Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности. Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского.* Москва, 2016. С.15-19.*(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

75. **Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В.** Режимы и механизмы обезвоживания продуктов в электромагнитном поле. *Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушки и термовлажносная обработка материалов) СЭТТ-14*: Пятый Международный научно-практический симпозиум 23-26сентября. 2014. Сборник трудов. Иваново, 2014. С.39-43. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

76. **Бандура В.М.** Розрахунок основних параметрів теплообміну у псевдозрідженому шарі. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання — запорука інноваційного розвитку харчової промисловості»* . Київ, 6-12 листопада. 2016. С.106-108

77. **Бандура В.Н**., **Терзиев С.Г., Войтенко А.К.** Программа развития енергетики АПК. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості».* Одеса: ОНАХТ, 2013. С.179-180.*(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

78. **Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.** Политика повышения эффективности использования энергии в пищевых технологіях. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості»*. Одеса: ОНАХТ, 2013. С.185-186. *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

79. **Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н.** Энергетический моніторинг пищевых технологий. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні та управлінські аспекти розвитку підприємств харчової промисловості»*. Одеса: ОНАХТ, 2013. С.186-187.*(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

80. **Паламарчук І.П., Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Вибір типу механічного привода для конвеєрної вібросушарки з гнучким робочим і транспортуючим органами. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології»*. Одеса: ОНАХТ, 2013. С. 27-30. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

81. **Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Перспективи застосування віброконвеєрного інфрачервоного сушіння сировини олійного виробництва. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні агротехнології: тенденції та інновації»*. Вінниця: ВНАУ, 2015. С. 11-13.*(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

82. **Бурдо О.Г., Бандура В.М., Буйвол С.М.** Енергетична політика та стратегія розвитку АПК в умовах кризи. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 50-тиріччю ТНТУ та 165-тиріччю з дня народження Івана Пулюя*, 19-21 травня 2010. Тернопіль, 339-340с. *(Особистий внесок: загальний задум, розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

83. **Бандура В.М., Друкований О.М.** Розвиток виробництва альтернативних відновлювальних видів енергії в світі. *Доповіді науково-практичної конференції «Світова фінансово-економічна криза та шляхи її подолання в Україні».* 17-18 грудня 2009. Вінниця, С.145-153 *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

84. **Бурдо О.Г., Буйвол С.М., Бандура В.М.** Кінетика екстрагування олії із рослинної сировини з використанням мікрохвильового поля. *Збірник статей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Новітні тенденції у харчових технологіях та якість і безпечність продуктів». Додатковий випуск Вісника Львівського інституту економіки і туризму*.05-06 квітня 2012. Львів. С.29-33 *(Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів*).

85. **Бандура В.М.** Інновації при виробництві олії. *Збірник праць XVI Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»* Одеса, 2016. С.167-173.

Тези доповідей у матеріалах наукових конференцій

86. **Бандура В.М.** Підвищення посівних якостей насіння шляхом інфрачервоного сушіння. *Матеріали Міжнародної наукової конференції «2016: Зернобобові культури та соя для сталого розвитку аграрного виробництва України»* 11-12 серпня. Вінниця. 2016. С.166.

87. **Бандура В.М., Коляновська Л.М.** Інтенсифікація процесів екстрагування олії із сої та ріпаку. *Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах».* Вінниця. 2013. С.15. *(Особистий внесок: загальний задум)*

88. **Бандура В.М., Жегалюк О.В., Паламарчук В.І.** Перспективи методу сушіння олійних культур з використанням інфрачервоного опромінення. *Матеріали всеукраїнської наукової конференції молодих учених*. Умань. 2012. С. 151 – 152. *(Особистий внесок: загальний задум).*

89. **Паламарчук І.П., Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Вибір типу механічного привода для конвеєрної вібросушарки з гнучким робочим і транспортуючим органами. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Інноваційні енерготехнології»*. Одеса. 2013. С. 27-30. *(Особистий внесок: загальний задум).*

90. **Бандура В.М., Жегалюк.О.В.** Екстрагування олієвмісної речовини етиловим спиртом в мікрохвильовому полі. *Енергія, бізнес, комфорт. Матеріали науково-практичної конференції* . 20 листопада. Одеса 2014.С.51-53. *(Особистий внесок: загальний задум).*

91. **Бандура В.М., Бережнюк Д.П.** Енергоефективне обладнання для екстрагування олієвмісної сировини рослинного походження. *Енергія, бізнес, комфорт. Матеріали науково-практичної конференції*. 20 листопада. Одеса. 2014. С.37-39. *(Особистий внесок: загальний задум).*

92. **Бандура В.М., Зозуляк. І.А.** Енергоощадне сушіння насіння соняшнику. *Енергія, бізнес, комфорт. Матеріали науково-практичної конференції* . 20 листопада. Одеса. 2014. С.55-56. *(Особистий внесок: загальний задум).*

93. **Паламарчук І.П., Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Вибір типу механічного привода для конвеєрної вібросушарки з гнучким робочим і транспортуючим органами. *Енергія, бізнес, комфорт. Матеріали науково-практичної конференції* . 20 листопада. Одеса. 2014. С.49-51. *(Особистий внесок: загальний задум).*

94. **Бандура В.М., Паламарчук В.І.** Перспективи застосування віброконвеєрного інфрачервоного сушіння сировини олійного виробництва. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні агротехнології: тенденції та інновації»*. Вінниця. 2015. С. 11-13. *(Особистий внесок: загальний задум).*

95. **Бандура В.М**. Інновації при виробництві олії. *Збірник праць XVI Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»* Одеса. 2016.С.167-173.

АНОТАЦІЯ

Бандура В.М. Науково-практичне обґрунтування енергоефективних технологій переробки олійної сировини на основі механічних та електромагнітних інтенсифікаторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська національна академія харчових технологій, Міністерства освіти й науки України, Одеса, 2021.

У дисертаційній роботі поставлені й вирішуються завдання підвищення енергоефективності переробки олійних культур, зниження затрат енергії на процеси сушіння та екстрагування соняшнику, ріпаку та сої, створення зразків техніки та методів їх розрахунку.

Методами енергетичного менеджменту проведені системні дослідження і встановлені енергоємні об’єкти. Рішення завдань в роботі проводилось за загальною схемою: «фізична і математична модель – експеримент – узагальнення та інженерна методика – створення експериментального зразка». Математичне моделювання ґрунтувалось на використанні класичних диференційних рівнянь. Експериментальне моделювання проводилось із залученням методів теорії подібності.

Проблема підготовки олійного насіння (сушіння) до переробки на олійноекстракційних заводах вирішена за допомогою інтенсифікаторів інфрачервоної (ІЧ) та мікрохвильової (МХ) дії. Виготовлені та пройшли апробацію в умовах виробництва експериментальні зразки ІЧ сушарок та МХ екстрактор. Розроблено їх типорозмірний ряд.

Проблема вилучення олії з макухи ріпаку та сої вирішена за допомогою мікрохвильових (МХ) інтенсифікаторів періодичної та безперервної дії. Емпіричні моделі отримані на основі методу «аналізу розмірностей».

Доведено економічну ефективність використання розроблених інноваційних зразків техніки і технології на олійножирових підприємствах.

Ключові слова: соняшник, ріпак, соя, сушіння, екстрагування, теплотехнології, моделювання, інфрачервоне та мікрохвильове випромінювання.

SUMMARY

Bandura V.M. Scientific and Practical Substantiation of Energy Efficient Technologies for Oilseed Raw Material Processing on the Basis of Mechanical and Electromagnetic Intensifiers. – Manuscript.

The thesis for a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Manufactures.– Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2021.

The oil and fat industry plays one of the key roles in Ukraine and it is one of the leading and mobile ones in the agro-industrial complex of the country. This is probably the only industry that is experiencing sustainable growth even under conditions of the global financial crisis. Currently, the problem of energy conservation is very urgent, which requires some restructuring in all industries as well as the widespread introduction of energy-efficient equipment and technology.

The tasks of energy efficiency increase when processing oilseeds, reduction of energy consumption when drying and extracting sunflower, rape and soybean, creation of samples of equipment and methods of their calculation have been set and solved in the thesis.

Contradictions that exist between the need to increase the cost of the drying agent to intensify heat and mass transfer and the attempt to reduce heat loss with the drying agent of the installation can be solved by traditional methods. Therefore, the research work considers the prospects and problems of drying with energy supply using mechanical and electromagnetic intensifiers.

Therefore, it is very important to conduct the research in order to ensure further improvement of the technique and technology of drying sunflower, rapeseed and soybean as the crops that are most often used as raw materials for oil processing and production by developing new drying methods and new constructions of dryers, as well as drying technologies, carrying out measures aimed at reducing the specific energy consumption for the drying process.

It has been found that volumetric methods of heat supply are promising for drying oilseed crops (sunflower, rapeseed and soybean), among which infrared and microwave ones have become the most widespread in the food and processing industries in recent years. They can provide uniform heating of the whole grain. In addition, there is no need to use air as a heat agent, which significantly reduces energy consumption for the drying process and ensures the “purity” of dried seeds. In this regard, the combination of infrared or microwave heat supply combined with vibration activation of the environment appears to be promising.

Since the extraction method remains the most waste-free in oil extraction technologies, and in the case of low-oil soybean seeds it is the most convenient one, it is proposed to intensify this process. The study of the possibility of using electromagnetic radiation during the extraction of oil from industrial crops of soybean and rapeseed is a promising area. The use of the microwave field will enable both to increase production efficiency and reduce energy consumption for the process.

Energy management methods have been used to conduct systematic research and to install energy-intensive facilities. The solution of the research problems has been carried out according to the general scheme: “physical and mathematical model – experiment – generalization and engineering technique – creation of the experimental sample”. Mathematical modeling is based on the use of classical differential equations. Experimental modeling is performed using the methods of similarity theory.

New results obtained in the form of criterion models are used as a basis for creating algorithms and computer programs for calculating and optimizing the developed samples of innovative technology.

The research work has resulted in the theory of heat and mass transfer, development of the theory of extraction from vegetable raw materials in the microwave field. The samples of innovative equipment, namely, a vibrating dryer of periodic action, a conveyor dryer of continuous action with infrared and microwave energy sources, a microwave extractor for oil production have been created and have passed bench and production tests. The samples of innovative non-energy-intensive products obtained on the developed equipment have met the state standards.

Economic efficiency of using the developed innovative samples of equipment and technologies at oil extraction plants is proved.

The economic efficiency of using the developed innovative samples of equipment and technologies at oil extraction plants is proved.

It has been scientifically substantiated that intensification of mass transfer processes during dehydration and extraction is provided through the reduction of the internal diffusion resistance due to the directed energy effect of the electromagnetic field. The method of combined drying of soybean, sunflower and rapeseed in the apparatus using infrared and microwave power supply has been developed for the first time; a mathematical description of drying kinetics, which determines the moisture content, grain temperature and air temperature in dryers of periodic and continuous action with the supply of mechanical and electromagnetic intensifiers, has been presented; methods of experimental modeling for determination of diffusion and mass yield coefficients in the processes of seed drying and extraction of rapeseed and soybean oil have been developed. The research work has further developed mathematical modeling of the infrared drying process in the mobile layer of raw materials using similarity numbers, research by “dimensional analysis” in order to obtain equations in generalized variables to calculate combined extraction processes in terms of volumetric microwave energy supply in raw material extraction modes, in the system “cake-ethanol, hexane”.

Key words: sunflower, rapeseed, soybean, drying, extraction, heat technologies, modeling, infrared and microwave radiation.

Підписано до друку 12.03.2021 р. Формат 60×90/16.
Ум.-друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим.

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