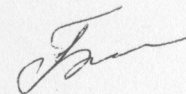


Автореферат
586

9

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



БОШКОВА ІРИНА ЛЕОНІДІВНА

УДК 536.2/537.868.3:66.04-035.2

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В
РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛАХ ПРИ ДІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Спеціальність **05.14.06** – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2015

Дисертація є рукописом

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Мазур Віктор Олександрович,
зав. кафедри термодинаміки та відновлюваної
енергетики Одеської національної академії
харчових технологій МОН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Потанов Володимир Олексійович,
зав. кафедри холодильної та торгівельної
техніки Харківського державного університету
харчування та торгівлі МОН України

доктор технічних наук, професор
Нікульшин Володимир Русланович,
зав. кафедри теоретичної, загальної та
нетрадиційної енергетики Одеського національного
політехнічного університету МОН України.

доктор технічних наук, професор
Дем'янчук Борис Олександрович,
зав. кафедри технічного забезпечення Військової
академії (м. Одеса) Міністерства оборони України

Хист дисертації відбудеться "30" червня 2015 р. в 13⁰⁰ в ауд.
... спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 ОНАХТ за адресою:
... 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

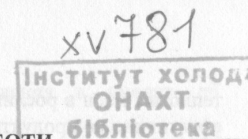
... можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної
... за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса,

"9" травня 2015 г.

Варна

Проекти і роботи №2.

В.І. Мілованов



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Термообробка матеріалів рослинного походження є визначальною для більшості технологічних процесів, зокрема сушіння, екстрагування та біостимуляції. Незважаючи на свою різноманітність, рослинні матеріали мають загальну специфіку, що полягає в будові рослинних клітин, анізотропії та наявності речовин з властивостями полярних діелектриків. Енергетична криза і збільшення попиту на продукцію поліпшеної якості викликали необхідність розвитку нових технологій. В цьому напрямку метод нагрівання в мікрохвильовому електромагнітному полі (МХ ЕМП) діелектричних матеріалів давно зарекомендував себе як високоефективний, застосування якого визнано доцільним для модернізації ряду технологічних схем виробництва та обробки матеріалів. У цей час визнані перспективними мікрохвильові технології сушіння, великий внесок у розвиток яких внесений Г. Фенгом (Feng, H.J.), М. Региром (Regier M.), Дж. Тангом (J. Tang), А. Хагхи (Haghi A.), Станкевічем Г.М., Бурдо О.Г., Календер'ян В.О.; технології виробництва кераміки, розробка яких здійснювалася на основі даних, наведених у роботах Р. Лукаса (Lukas R.), Рибаківа К.І., Козлова П.В.; екстрагування в умовах дії мікрохвильового поля, досліджуване у всіх передових країнах світу, теорія й практика якого викладені, зокрема, у монографії Ф. Чемата (Farid Chemat); мікрохвильова стерилізація, принципи якої визначені у роботах Харлфінгера Л. (Harlfinger L.) і Редькіна С.В., біостимуляція насіння, найбільш повно досліджена науковими групами Калініна Л.Г. і Нельсона С. (Nelson S.).

Фундаментальні роботи Е. Окреса (E. Ocressa), Лебедева І.В., Некрутмана С.В., Г. Пюшнера, Рогова С.В. свідчать про раціональність заміни в ряді випадків традиційних технологічних схем на схеми, які передбачають мікрохвильове нагрівання, що дозволяє одержати позитивний ефект по ряду показників (тривалість процесу, енергетична ефективність, екологічність, одержання кінцевого продукту з поліпшеними або унікальними властивостями). В той же час слід констатувати, що промислове мікрохвильове обладнання не знайшло на даний час широкого поширення. Істотними стримуючими факторами є недостатня повнота теоретичних та експериментальних досліджень, що не дозволяє визначати сукупність ефектів, які виникають у матеріалі під дією мікрохвильового поля, неповнота уявлень фізичних процесів взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з неоднорідними діелектричними матеріалами, внаслідок чого ускладнене складання адекватних та коректних математичних моделей, прогнозування змін фізичних величин при переході до систем іншого масштабу. Неповнота знань про механізми інтенсифікації явищ переносу теплоти й маси в рослинних матеріалах і факторах виникнення цих явищ не дозволяє одержувати стійкі результати при мікрохвильовій обробці та розробляти ефективні мікрохвильові технології. Узагальнюючи вищевикладене, можна стверджувати, що дослідження процесів взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з матеріалами рослинного походження, фізичне і математичне моделювання та визначення умов інтенсифікації процесів переносу

теплоти і маси в рослинних матеріалах, є актуальними в сучасних умовах розвитку ефективних по продуктивності та енергетично доцільних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Закону України "Про енергозбереження", затвердженого Постановою Верховної Ради України №74 / 94 01.07.1994 р.; "Основних положень енергетичної стратегії України на період до 2030 р.", прийнятих Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.; Закону Кабінету Міністрів України № 148 від 5.02.97 р., що затвердила "Комплексну Державну Програму Енергозбереження". Робота виконувалась у рамках держбюджетної тематики кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської державної академії холоду МК 06/14 "Розробка і дослідження енергозберігаючих технологічних процесів сушіння зерна на основі мікрохвильового підігріву" (ДР № 0106U002628), 2006-2008 рр.; МК 09/13 "Створити та дослідити пілотну установку для МХ-конвективного сушіння зернових та олійних культур у щільному рухомому шарі" (ДР №0109U000421), 2009-2010 рр.; МК 12/05 "Розробка нової енергозберігаючої технології сушіння зернових матеріалів із застосуванням мікрохвильового поля" (ДР №0112U000732), 2012-2014 р, МК 14/02 "Розробка методу отримання природних пестицидів з рослинних матеріалів при застосуванні мікрохвильового нагрівання" (ДР №114U000074), з 01.01.2014 по даний час. Ця робота є продовженням і розвитком досліджень тепломасопереносу в щільних дисперсних системах, що проводяться на кафедрі теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв (ТТТЕ) ОНАХТ.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є всебічне теоретичне та експериментальне обґрунтування науково-технічних підходів до інтенсифікації процесів переносу теплоти та маси під впливом мікрохвильового електромагнітного поля в технологіях термообробки матеріалів рослинного походження (зерно, стебла та інші частини рослин).

Завдання досліджень:

- провести аналіз теоретичних уявлень розповсюдження електромагнітного поля мікрохвильової частоти в анізотропних неоднорідних діелектричних матеріалах, дослідити особливості взаємодії МХ ЕМП з полярними діелектриками;
- провести дослідження процесів переносу в рослинних матеріалах різного виду в умовах дії мікрохвильового поля при варіюванні формою укладки, масою завантаження, вологовмістом, вихідною потужністю магнетрону;
- дати оцінку теплового ефекту взаємодії електромагнітного поля з діелектричними матеріалами та ефективності трансформації енергії мікрохвильового поля на кінетику та динаміку сушіння щільного шару зернових матеріалів при різних способах підведення теплоти;
- сформулювати фізичну модель процесів перетворення енергії МХ ЕМП у внутрішню енергію відповідно до диференційованої структури рослинного матеріалу, провести дослідження та обґрунтувати механізм виникнення ефекту біостимуляції насіння;
- дослідити процес екстрагування з рослинних матеріалів під впливом МХ ЕМП, визначити ефект дії мікрохвильового поля на якісні характеристики екстрактів і

встановити раціональні фізичні параметри екстрагування в умовах дії мікрохвильового поля;

- провести моделювання температурних полів у рослинних матеріалах при дії позитивних (мікрохвильове поле), позитивних та негативних (мікрохвильове поле і волога, що випаровується) джерел теплоти;
- провести конструювання та розробити методи теплових розрахунків мікрохвильово-конвективних установок для сушіння дисперсних матеріалів і термічної обробки рослинних матеріалів (зокрема зерна, соломи, стебелів) на підставі теорій посилення ефектів переносу.

Об'єкт дослідження – процеси переносу теплоти і вологи при взаємодії електромагнітного поля мікрохвильової частоти з рослинним матеріалом.

Предметом дослідження є основні теплові характеристики процесу перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію рослинного матеріалу, а також фізичні характеристики рослинних матеріалів.

Методи досліджень – експериментальні та аналітичні методи дослідження ефектів взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з матеріалами рослинного походження, теплові методи аналізу ефектів перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію матеріалу, методи статистичного і кореляційного аналізу експериментальних даних; фізико-математичне моделювання процесів взаємодії діелектричних матеріалів рослинного походження з мікрохвильовим електромагнітним полем, методи обчислювальної математики, алгоритмізації розрахунків і програмування з використанням засобів "MAPLE V", "Origin 6", "Matcad" та "Excel 12".

Наукова новизна одержаних результатів.

В результаті виконання дисертаційної роботи було *вперше* отримано ряд нових, науково-обґрунтованих результатів, які мають принципове значення для розуміння ефектів дії мікрохвильового поля на матеріали рослинного походження та розвиток уявлень про методи інтенсифікації процесів переносу:

- доведено, що енергетичну ефективність перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію матеріалу визначає маса завантаження матеріалу, його вид, вологовміст, а також співвідношення площі поверхні до товщини шару матеріалу;
- доведено, що для сушіння зерна при мікрохвильовому (пульсуючому й безперервному), конвективному і мікрохвильово-конвективному (циклічному і безперервному) підводі енергії оптимальним є безперервний мікрохвильово-конвективний спосіб підведення енергії;
- визначено, що закономірності кінетики сушіння щільного шару зернових матеріалів не залежать від способу підведення енергії (мікрохвильовий, конвективний, мікрохвильово-конвективний) і описуються єдиними узагальненими рівняннями для середньоінтегрального вологовмісту і температури;
- встановлено, що при пульсуючому мікрохвильовому сушінні з питомою потужністю мікрохвильового поля $q, \approx 10^6 \text{ Вт/м}^3$ незалежно від тривалості пауз

у діапазоні 20...80 с, маса випареної із зерна вологи визначається сумарною експозицією;

- встановлено, що при циклічному мікрохвильово-конвективному сушінні зерна з початковим вологовмістом не нижче 20 % на початковій стадії процесу швидкість сушіння вище в періоді продукції (конвективного процесу), а на кінцевій стадії збільшується швидкість мікрохвильового сушіння;
- запропонована і підтверджена експериментально гіпотеза виникнення ефекту біостимуляції насіння при експозиції МХ полем та розроблено алгоритм розрахунків припустимої витримки насіння у мікрохвильовому полі;

За результатами проведених досліджень сформульовано наступні наукові положення:

1. **Ефект біостимуляції насіння під дією мікрохвильового електромагнітного поля визначається підвищенням транспортних властивостей рослинної тканини, що призводить до посилення транслокації живильних речовин.** Дане положення засноване на всебічному аналізі результатів експериментів по визначенню фізико-хімічних змін в період гідратації насіння, оцінки властивостей переносу рослинної тканини після МХ обробки, визначення тривалості збереження ефекту та результатів розрахунків величини припустимої МХ експозиції по розробленій методиці, що враховує специфіку будови рослинної тканини та особливості нагрівання при дії МХ поля.
2. **При екстрагуванні рослинних матеріалів надкритичними флюїдами з нагріванням в мікрохвильовому полі профіль швидкостей в капілярах при ламінарному русі у флуктуаційному околі критичної точки флюїдів наближається до форми усіченої параболи.** Дане твердження засноване на результатах обчислювань, проведених по отриманій в роботі аналітичній залежності для локальних по радіусу капіляра швидкостей при ламінарному русі флюїдів. Залежність основана на рівнянні руху з урахуванням стисливості потоку та вкладу об'ємної в'язкості. Область застосування пропонованої залежності охоплює весь діапазон змін параметрів стану флюїдів та включає окремий випадок ламінарного руху нестисливої рідини, профіль швидкостей для якої згідно закону Пуазейля має форму параболи.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій доводяться:

- всебічними експериментальними дослідженнями процесів взаємодії мікрохвильового поля з рослинними матеріалами та репрезентативністю отриманих експериментальних даних, що відображують досліджуваний об'єкт;
- повторюваністю експериментальних даних і їх передбачуваністю на основі отриманих висновків, а також натурних спостережень процесів термообробки рослинних матеріалів в умовах дії мікрохвильового електромагнітного поля;
- математичними доказами, що відповідають обчислювальним експериментам, і їх зіставленням з даними експериментальних досліджень процесів переносу теплоти та маси під дією МХ ЕМП;
- апробацією результатів досліджень на практиці та збігом явищ з побудованими теоретичними та емпіричними моделями.

Наукова значимість роботи:

- модельні уявлення про зміни структури, температури і тиску в рослинній тканині, зокрема в рослинній клітині, що обмежена клітинними стінками, відкривають новий напрямок теоретичного дослідження ефектів нагрівання при дії внутрішніх джерел енергії, в основі якого є вивчення особливостей диференційованої структури тіла та термодинамічний аналіз явищ переносу теплоти та маси;
- диференційне рівняння теплопровідності в часткових похідних параболічного типу з урахуванням позитивних та негативних джерел теплоти, що відображує фізичну природу процесу переносу теплоти та вологи в матеріалі, рекомендовано для використання при побудові математичних моделей теплопровідності та проведення відповідних розрахункових досліджень і здатне поповнити теорію теплопровідності новими даними стосовно нестационарного температурного поля при дії внутрішніх джерел, зокрема мікрохвильового поля;
- отримана залежність для розрахунку локальної швидкості флюїдів при ламінарному русі в капілярі дозволяє проводити аналітичні дослідження змін профілю швидкості в околиці критичної точки, що удосконалює моделювання потоків флюїдів та дозволяє дослідити вплив стисливості на коефіцієнти переносу.

Практична цінність роботи. Отримані практичні рекомендації щодо методів формування шару зернового матеріалу для забезпечення рівномірного сушіння та вибору режимних параметрів з метою підвищення енергоефективності процесу в умовах мікрохвильового нагрівання.

Запропоновані оптимальні режимні параметри, що забезпечують виникнення ефекту біостимуляції насіння. Рекомендовані технологічні параметри обробки соломки при підготовці субстратів. Проведена селекція екстрактів-біопестицидів з рослин, що розповсюджені на території України, для отримання яких ефективно використовувати МХ обробку.

Розроблені методики розрахунків мікрохвильово-конвективних сушильних установок для щільного рухомого шару зерна з утилізацією теплоти від системи забезпечення теплового режиму магнетронів, за результатами яких сконструйовані сушарки МКС з системою повітряного охолодження магнетронів та з системою рідинного охолодження.

Розроблена мікрохвильова технологія передпосівної мікрохвильової обробки насіння сільськогосподарських культур, що впроваджена для підвищення схожості посівного матеріалу, та сконструйована установка безперервної дії для забезпечення цієї технології.

Розроблений метод мікрохвильової підготовки субстрату для дереворуйнуючих грибів, застосування якого дозволяє суттєво знизити енерговитрати (у порівнянні із традиційними методами), поліпшити якість кінцевого продукту та підвищити врожайність. Для реалізації даного методу сконструйовані мікрохвильові установки періодичної і безперервної дії.

Особистий внесок здобувача. Усі положення, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем. У роботах, виконаних разом з іншими дослідниками, здобувачеві належать висування, розвиток і перевірка гіпотез щодо механізмів

біостимуляції насіння та ефектів впливу мікрохвильового поля на рослинну тканину, що приводять до інтенсифікації процесів переносу; побудова математичних моделей теплопереносу при дії внутрішніх джерел теплоти, позитивних та негативних; складання програм розрахунків і проведення варіативних розрахунків, розробка методик експериментальних досліджень кінетики сушіння зернових матеріалів і термообробки рослинного матеріалу, аналіз і узагальнення експериментальних даних, отриманих при дослідженні процесів перетворення енергії електромагнітного поля у внутрішню енергію тіла. Здобувачем також особисто розроблені методи оцінки теплового ефекту взаємодії мікрохвильового поля з рослинним матеріалом, впроваджені для практичного використання, а також проведено докладний аналіз методів моделювання теплопровідності в тілі при наявності внутрішніх джерел теплоти, на підставі якого побудовані нові аналітичні моделі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені та обговорені на конференціях і семінарах: 76th International Bunsen Discussion Meeting Global Phase Diagrams (Germany, Walbeberg, 2001), 17th IUPAC Conference on Chemical Thermodynamics ICCT 2002 (Germany, Rostoc, 2002), V Міжнародній науково-практичній конференції "Хлібопродукти-2005" (Одеса, 2005), VIII міжнародній науково-практичній конференції "Наука і освіта – 2005" (Дніпропетровськ, 2005), Третьому семінарі "Інформаційні системи і технології" (Одеса, 2005), Четвертому семінарі "Інформаційні системи і технології" (Одеса, 2006); VI Мінському міжнародному форумі по тепло - і масообміну (Мінськ, 2008); Humbolt-Kolleg "Sciences, Engineering and Humanities for Energy Worlds" (Одеса, 2009); Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні проблеми холодильної і криогенної техніки" (Одеса, 2009), Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексное использование биоресурсов: малоотходные технологии" (Краснодар, 2010), Міжнародному науково-технічному семінарі "Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов" (Воронеж, 2010); Міжнародній науково-практичній конференції "Современные проблемы холодильной техники и технологии" (Одеса, 2011), Міжнародній науково-практичній конференції "Інноваційні енерготехнології" (Одеса, 2011), IX міжнародній науково-практичній конференції "Актуальні питання біологічної фізики та хімії" (Севастополь, 2013); II Международной научно-технической конференции "Современные проблемы физики, химии и биологии" ФизХимБио-2013 (Севастополь, 2013 год); 19-й Всеукраїнській науково-практичній конференції "Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя" (Запоріжжя, 2013), XV Міжнародній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми енергетики та екології" (Одеса, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні тенденції розвитку медичної науки та медичної практики" (Львів, 2014), Міжнародній науковій конференції, присвяченій 130-іччю Національного університету харчових технологій "Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості" (Київ, 2014).

Публікації. За матеріалами дисертації автором опубліковано 45 друкованих праць, у тому числі 1 монографія, 7 статей у закордонних виданнях, та отримано 7 патентів.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку літератури з 259 найменувань і додатків. Робота викладена на 302 сторінках друкованого тексту основної частини, включаючи 74 рисунка і 56 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надана загальна характеристика дисертації, що включає обґрунтування актуальності роботи, мету і завдання досліджень, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, основні положення, що виносяться на захист і публікації за темою дослідження.

У першому розділі аналізується сучасний рівень використання енергії мікрохвильового електромагнітного поля як джерела теплоти, вивчаються фізичні уявлення про механізм взаємодії електромагнітного поля з діелектричними матеріалами і досліджується можливість аналітичного опису процесу перетворення енергії електромагнітного поля у внутрішню енергію тіла. Дослідники, що вивчають особливості мікрохвильового нагрівання, відзначають, що застосування енергії мікрохвиль дозволяє значно спростити технологічну схему, виключивши або обмеживши використання процесів і апаратів, пов'язаних з підготовкою теплоносія, а також знизити рівень шкідливих викидів в атмосферу. У той же час, у більшості випадків високі витрати, пов'язані зі створенням і використанням мікрохвильового аналога традиційних технологій, не дозволяють розраховувати на позитивний економічний ефект, якщо відбувається тільки зміна джерела теплової енергії. Існує необхідність в додаткових дослідженнях ефектів взаємодії матеріалів з мікрохвильовим полем та в комплексному аналізі результатів. На прикладі спікання кераміки в мікрохвильовому полі, процеси якої досліджені найбільше повно, демонструються ефекти об'ємного нагрівання: зразки характеризуються значно меншими розмірами кристалітів (рис.1), що пояснюється інтенсифікацією зернограничної дифузії.

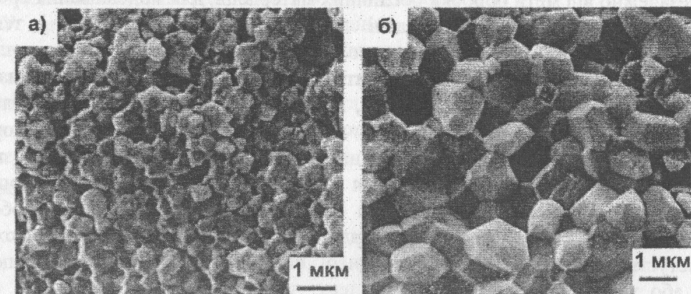


Рис. 1. Мікроструктура зразків ZrO_2 , отриманих в а) мікрохвильовій і б) звичайній печі (за даними А.С. Ванецева, 2011).

Як результат досліджень, встановлено, що для матеріалів з низькою теплопровідністю тільки гібридні, або комбіновані, методи приводять до однорідності нагрівання. Мікрохвильова обробка рослинного матеріалу приводить до істотної внутрішньої температурної неоднорідності, яка підсилюється в місцях більшого вологовмісту. Внаслідок нерівномірності у вологовмісті в різних частинах рослин, зокрема, у їхній судинній системі, під дією мікрохвильового поля відбувається драматичне розширення судин, стінки яких при розвитку високих тисків розриваються, що дозволяє рідині вільно випливати в напрямку щодо прохолодного розчинника.

На рис.2 представлені мікрографи повздовжнього зрізу ксилеми деревини (грузнув американський), які ілюструють, що генерація теплоти в більшій мірі мала місце усередині судин ксилеми.

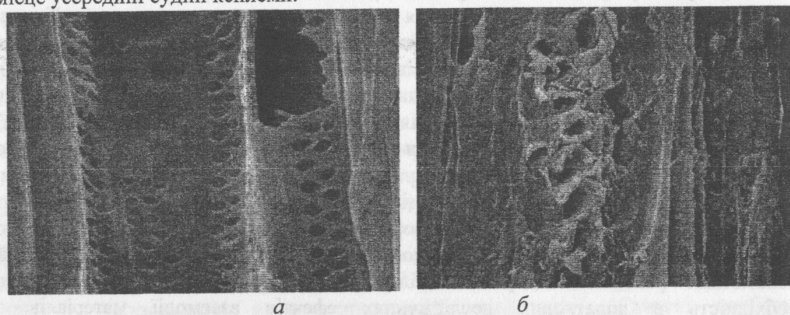


Рис. 2. Мікрографи клітин ксилеми деревини, отримані за допомогою електронного мікроскопа (за даними S.D.Armstrong, 1999).

a – контроль (без обробки), *b* – після МВ екстракції.

Експозиція – 15 хв., потужність – 90 Вт.

Незалежно від мети обробки рослинних матеріалів, для моделювання процесів і розвитку технології необхідні дані про температуру матеріалу і теплоту перетворення енергії мікрохвильового поля, оцінка яких розрахунковим шляхом представляє специфічні складності. Робляться спроби вирішувати електродинамічні завдання для мікрохвильового діапазону, пристосовуючи рівняння Максвелла, що має суттєві обмеження внаслідок того, що система рівнянь Максвелла описує електромагнітне поле у вакуумі і суцільних однорідних середовищах. Для розв'язку завдань взаємодії електромагнітного поля мікрохвильової частоти з анізотропними неоднорідними середовищами останнім часом розробляються методи дробового диференціювання та інтегрування. Наявність у рівняннях дробової похідної інтерпретується як відображення особливої властивості описуваного процесу – пам'яті, або, у випадку стохастичного процесу – немарковості.

Використання законів ередітарності Вольтерра та методу дробових похідних (В.В. Учайкин, 2008) відкриває можливість адекватного математичного моделювання процесів взаємодії діелектричного матеріалу з мікрохвильовим полем, однак у цей час методи дробового векторного математичного аналізу і дробового

вирахування для побудови моделей фізичних систем розвинені недостатньо. Проблема моделювання також ускладнюється тим, що взаємозалежна система рівнянь Максвелла й теплопровідності, що описує МХ нагрівання, вирішується досить складно не тільки аналітичними, але й чисельними методами.

Розглянуті методи розв'язання крайових задач теплопровідності в тілі при наявності внутрішніх джерел теплоти, використання яких дозволяє отримувати математичні моделі переносу теплоти в явному вигляді. Наведені рішення отримані з диференціальних рівнянь параболічного типу, прийнятні для випадку, коли швидкість поширення теплоти може вважатися нескінченно великою і приводить до підвищення температури у всіх точках тіла відразу після початку дії джерела теплоти. При високошвидкісних процесах лінійний зв'язок між тепловим потоком і градієнтом температур порушується. У таких випадках щільність теплового потоку q визначається узагальненим законом Фур'є:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla t - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau} \quad (1)$$

де τ_r – постійна часу (час релаксації). При різкій зміні q перебудова температурного поля і градієнта температури відбувається зі зсувом у часі (τ_r).

Диференціальне рівняння теплопровідності для релаксаційних процесів без обліку внутрішніх джерел теплоти було отримано при використанні рівняння теплового балансу та узагальненого закону Фур'є – гіперболічне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} = a \nabla^2 t \quad (2)$$

Від вибору диференціального рівняння теплопровідності, гіперболічного – для процесів високошвидкісного нагрівання, або параболічного типу – для процесів малої інтенсивності, залежить вірність отриманих рішень.

У другому розділі проведена оцінка основних фізичних характеристик процесу взаємодії мікрохвильового електромагнітного поля з матеріалом і розглядаються особливості перетворення енергії мікрохвильового поля у теплову. Питома потужність, що виділяється у вигляді тепла в одиниці об'єму матеріалу, що перебуває в мікрохвильовому полі, виражається рівнянням (3), і пов'язана з його діелектричними характеристиками ϵ' і $\tan \delta$, частотою коливаний f поля та напруженістю електричного поля E :

$$q_v = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \epsilon' \tan \delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3 \quad (3)$$

Для визначення значень ϵ' і $\tan \delta$ існують відпрацьовані експериментальні методики, однак оцінка E представляє особливу складність. Ще одна проблема полягає в можливості зміни робочої частоти f у резонансній камері – в загальному випадку величина f не є фіксованим значенням, а залежить від модуля і фази

комплексного коефіцієнта відбиття, на які, в свою чергу, впливають діелектричні характеристики матеріалу та його маса. Внаслідок неаявності основних величин, що входять у рівняння (3), раціонально визначати долю електромагнітної енергії, що перетворена у внутрішню енергію тіла, за даними теплових експериментів, а ефективність перетворення енергії електромагнітного поля встановлювати на підставі теплового балансу. Теплота перетворення Q_{Σ} , яка визначається теплою нагрівання досліджуваного зразка об'ємом V і теплою випарювання вологи за час τ , з урахуванням втрат у навколишнє середовище шляхом променистого і конвективного теплообміну $Q_{\text{випр}} = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{пром}}$, визначається (4):

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{випр}} \quad (4)$$

де Δt – зміна температури матеріалу масою m і теплоємністю c , Δm – кількість води, що випарувалася.

Корисний тепловий потік $Q_{\text{кор}}$, у якому враховується теплота нагрівання зразка і теплота, що витрачена на випарювання вологи, визначається залежністю (5):

$$Q_{\text{кор}} = (c \cdot m \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / \tau, \text{ Вт} \quad (5)$$

Приклад розрахунків основних характеристик теплового ефекту перетворення енергії МВ поля в матеріалі, отримані для різних мас матеріалу, товщини шару δ і площі поверхні $F_{\text{пов}}$, наведені в табл. 1, де η_k – ККД мікрохвильової камери, обумовлений залежністю (6):

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{вих}}} \quad (6)$$

де $P_{\text{вих}}$ – вихідна потужність магнетрона.

Значення ККД камери η_k можна знайти по відповідних емпіричних залежностях, отриманих у роботі. Наприклад, для розрахунків ККД камери при завантаженні зерновими матеріалами (овес, пшениця, ячмінь, гречка) рекомендована емпірична залежність, яка враховує повноту завантаження камери симплексом V_M / V_K :

$$\eta_k = 0,67 \left(1 - \frac{0,45}{1 + e^{\left(\frac{V_M / V_K - 0,003}{0,0017} \right)}} \right) \left(\frac{u}{u_0} \right)^{1,3}, \quad (7)$$

де V_M – об'єм, займаний матеріалом, V_K – об'єм камери, u – поточний вологовміст, $u_0 = 0,2$. При зміні відносного обсягу V_M / V_K від 0,0015 до 0,03 ККД камери описується залежністю (8) з похибкою $\pm 17\%$.

Залежність (7) отримана для умов, при яких для даної маси завантаження спостерігався найвищий ККД камери.

Таблиця 1

Теплові характеристики процесу нагрівання зернового матеріалу в мікрохвильовій камері. Початковий вологовміст $u_0 = 20\%$, тривалість обробки $\tau = 60$, вихідна потужність магнетрона $P_{\text{вих}} = 160$ Вт

№	m, кг	$F_{\text{пов}} \cdot 10^3 \text{ м}^2$	t, °C	δ , м	$Q_{\text{випр}}$, Вт	$Q_{\text{конв}}$, Вт	$Q_{\text{кор}}$, Вт	η_k
1	0,05	18,4	60	0,008	1,3	6,9	33,6	0,26
2	0,06	15	68	0,016	1,35	7,1	38,0	0,29
3	0,1	18,4	75	0,016	2,08	10,5	48,6	0,38
4	0,15	28,6	65	0,016	3,1	11,7	51,2	0,41
5	0,2	39,6	55	0,009	2,9	10,3	50,5	0,40
6	0,2	29,4	83	0,032	5,0	16,1	69,4	0,57
7	0,31	59,8	47	0,009	2,7	8,1	48,4	0,37
8	0,31	33,2	90	0,016	6,3	17,0	72,2	0,60
9	0,31	11,2	98	0,048	6,7	17,5	76,4	0,63

Результати показують, що при зменшенні завантаження ККД камери знижується. Аналіз експериментальних даних довів, що на ККД камери також впливає співвідношення площі відкритої поверхні матеріалу $F_{\text{пов}}$ та товщини шару δ , що слід враховувати при побудові рекомендацій щодо підвищення ККД камери.

Для оцінки теплового ефекту взаємодії мікрохвильового поля з матеріалом потрібні знання діелектричних характеристик, таких як відносна діелектрична проникність ϵ' , тангенс кута втрат $\text{tg} \delta$ і коефіцієнт втрат $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg} \delta$. Теоретичні уявлення діелектричних характеристик не дають можливості їх визначення розрахунковим шляхом, що викликало необхідність проведення експериментів. Виміри проводилися на рослинних матеріалах, які використовуються при термообробці в процесах екстрагування, сушіння зернових, біостимуляції, термообробки рослинної сировини (на прикладі соломи) за допомогою резонансного методу. Результати показують, що зі збільшенням вологості в інтервалі $u = 0,13 \dots 0,28$ діелектрична проникність ϵ' пшениці зростає. Значення $\text{tg} \delta$ складним образом залежать від вологості, однак можна відзначити, що з ростом вологості зерна величина $\text{tg} \delta$ має тенденцію до зростання. Величина коефіцієнта (фактора) втрат $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg} \delta$ для пшениці твердої знаходиться в межах $\epsilon'' = 1,62 \dots 4,84$; для пшениці м'якої $\epsilon'' = 1,53 \dots 4,34$. Визначено, що вплив вологовмісту на коефіцієнт втрат ϵ'' для пшениці істотніше, чим вплив температури. Це демонструють залежності (8) і (9), отримані у вигляді поліномів:

$$\epsilon'' = 1,90 - 0,0916u + 0,0074u^2 \quad (8)$$

$$\epsilon'' = 2,99 + 5,95 \cdot 10^{-5} t - 2,7410^{-5} t^2 \quad (9)$$

Середньоквадратична похибка формули (8) становить $\pm 16\%$, формули (9) – не перевищує $\pm 15\%$.

Дані, отримані на здрібненій соломі з вологовмістом 300% (вологість 75%) при різних значеннях температур, узагальнюються залежністю (10) із середньоквадратичною похибкою $\pm 17\%$:

$$\varepsilon'' = 10,47 + 0,193t - 0,0029t^2 \quad (10)$$

У порівнянні із зерном, вплив температури позначається набагато істотніше, що пов'язане з більшим вологовмістом соломи.

Вплив щільності упаковки здрібненої соломи описується поліномом (11) з середньоквадратичною похибкою $\pm 15\%$:

$$\varepsilon'' = 3,91 + 0,0161\rho + 4,2 \cdot 10^{-5} \rho^2 \quad (11)$$

- для підвищення ефективності використання енергії мікрохвильового поля в рослинних матеріалах доцільно підвищувати щільність шару.

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень мікрохвильової обробки рослинних матеріалів як основи для створення ряду технологій: передпосівної обробки насіння, термообробки рослинного матеріалу та екстрагування біологічно активних речовин. Усі ці технології поєднують умови ведення процесу: основна доля мікрохвильової енергії витрачається на нагрівання матеріалу і зневажливо мала частина – на випарювання вологи, що зв'язано зі специфікою даних методів. Основне, що відрізняє оброблювані матеріали, застосовуване у зазначених методах – істотна відмінність у вологовмісті. Так, при передпосівній обробці насіння вологовміст відповідав рівноважному, при підготовці субстрату – рівню 280-300%, В процесах екстрагування вологовміст доходив до 100%. Відповідно, при розробці цих методів переслідувалися різні цілі, що визначило ряд специфічних завдань для кожного з них. Як було встановлено, ефекти, одержувані при реалізації кожного з розглянутих методів, пов'язані зі зміною структури рослинного матеріалу в ході МХ обробки. Але якщо при розвитку методу біостимуляції насіння одним із завдань було виключення режимів, що порушують цілісність клітинних стінок, то при підготовці рослинного субстрату та при екстрагуванні руйнування рослинної структури приводить до істотної інтенсифікації процесів масопереносу.

Основною проблемою при розробці мікрохвильової технології біостимуляції було питання про механізм виникнення даного ефекту. При визначенні механізмів біостимуляції паралельно аналізувався ряд гіпотез: дія на ферментативну систему рослин, провокування виходу насіння зі стану спокою при нагріванні, інформаційний сигнал. Дані гіпотези не знайшли підтвердження: метаболічна активність насіння зберігається вкрай низькою до початку гідратації, як і в контрольних зразках. Також виявлено, що при оптимальному режимі мікрохвильової обробки ефект біостимуляції зберігається протягом півроку, про що свідчать результати перевірки насіння на лабораторну схожість після різних за часом періодів витримки у негідратованому стані. Це привело до припущення, що у

режимі біостимуляції виникають зміни в структурі рослинної тканини, пов'язані з розвитком великих градієнтів тиску в замкнених мікрооб'ємах рослинної тканини (пори, целюлозні мікрофібрили), що викликає розтин локальних ізольованих ділянок та зменшення щільності провідної системи, внаслідок чого збільшується провідність для живильних речовин. Для перевірки цієї гіпотези були проведені біохімічні дослідження активності ферментів α -амілази і кислій фосфатази в гідратованому насінні після впливу МХ ЕМП. Через 18 годин відзначалося збільшення активності ферменту α -амілази до 294% ($p < 0.001$) стосовно контролю (без обробки). Гіпотеза про збільшення проникності рослинної тканини для живильних речовин при дії МХ поля підтверджена результатами перевірки характеристик транспортних властивостей по ступеню ексудації цукрів і по провідності тканини ніжок грибів, оброблених у МХ поле. На підставі цієї гіпотези була створена методика, що дозволяє оцінити припустимий час впливу МХ поля на посівний матеріал. На рис. 3 наведений вид граничних за допустимою температурою кривих для насіння пшениці твердої залежно від вологості насіння, отриманих для умов обробки 1 кг у мікрохвильовому полі, створюваному магнетроном з вихідною потужністю 1 кВт.

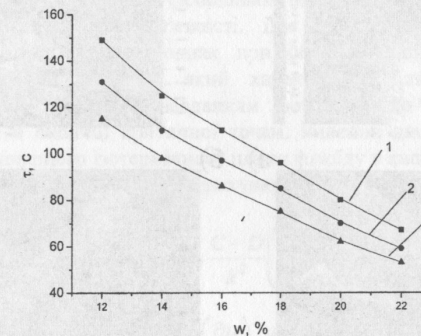


Рис. 3. Допустимі температури передпосівної обробки насіння пшениці в мікрохвильовій камері при різних початкових температурах матеріалу t_n . Вихідна

потужність магнетрона – 1 кВт.

1 – $t_n = 10^\circ\text{C}$, 2 – $t_n = 15^\circ\text{C}$, 3 – $t_n = 20^\circ\text{C}$.

В основі методики лежить наступна схема протікання процесів, пов'язаних з нагріванням насіння в умовах дії МХ поля. Спочатку протікає квазіізобарний процес в об'ємі рослинної клітини. У той же час у замкнених мікрооб'ємах інтенсивно росте тиск, що впливає на структуру капілярно-пористої тканини та приводить до збільшення її проникності. При подальшому підведенні МХ енергії, коли клітини вже не мають резерву для компенсації збільшення об'єму цитоплазми, починається наростання тиску в об'ємі самої клітини, ці явища в остаточному підсумку приводять до порушення цілісності клітинних оболонок. Подальше перебування насіння під дією МХ ЕМП приводить до перегріву, здатного незворотно змінити

структуру білкових молекул, привести до виносу рідини і розчинених речовин під дією градієнта температури й тиску за межі зерна, карамелізації цукрів. Останні режими є неприпустимими. Розроблена методика дозволяє оцінити допустиму тривалість обробки насіння при заданій потужності мікрохвильового джерела.

Результати дослідження процесу термообробки рослинного матеріалу в мікрохвильовому полі як основи субстрату для дереворуйнуючих грибів на прикладі гливи свідчать про високу ефективність мікрохвильової обробки солом'яного субстрату у випадку його інфікування фітопатогенами, зокрема, тріходермою (*Trichoderma viride* (Pers.) Fr.). Термообробка з використанням мікрохвильового методу в режимах, що поліпшують живильні для міцелію властивості солом, пояснюються зміною структури матеріалу. Структурні особливості солом після МХ обробки, отримані на основі атомно-силового методу зондової мікроскопії (Н.М. Московський, 2010), представлені на рис. 4.

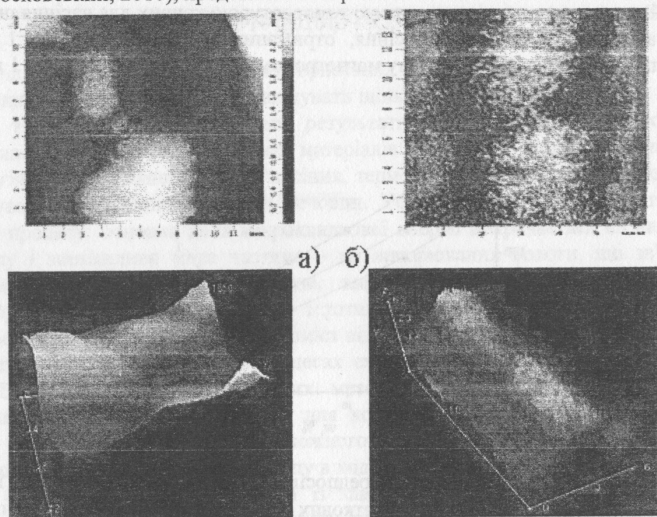


Рис. 4. 3-D модель поверхні соломистого матеріалу розміром 23х23 мкм.
а — вихідний матеріал; б — оброблений у МХ полі.

Виявлено, що при мікрохвильовій обробці соломистого субстрату з вологовмістом не вище 20 % витрати енергії менше, чим при обробці матеріалу, зволоженого до необхідного за традиційною технологією рівня 73-75%, однак обростання субстратних блоків міцелієм суттєво гірше, що говорить про знижений ефект стерилізації. Експерименти показали також наявність оптимуму на залежності ступеня обростання міцелієм субстрату і режимом обробки. Поверхня вихідного соломистого матеріалу являє собою гладку і відносно однорідну поверхню по висоті, у той час як поверхня обробленого зразка відрізняється істотною

шорсткістю. Отримані результати свідчать про розширення капілярів внаслідок мікровибухів.

Проведені дослідження екстрагування біологічно активних речовин з рослинних матеріалів в умовах дії мікрохвильового електромагнітного поля показали можливість одержання екстрактів протягом короткого проміжку часу, зниження енергетичних витрат, крім того, такі екстракти часто проявляють нові властивості. Найбільш перспективна з погляду максимального збільшення повноти витягу та одержання екстрактів з новими властивостями є надкритична екстракція в присутності мікрохвильового поля. Надкритична екстракція в умовах мікрохвильового нагрівання можлива при змішуванні неполярних розчинників, традиційно застосовуваних у цьому процесі, з полярними. Лінійна молекула CO_2 є неполярною доти, поки її структура не спотвориться під дією інших молекул (у тому числі й H_2O). Це показує шлях розвитку комбінованої надкритичної екстракції в мікрохвильовому полі. При екстрагуванні в термодинамічній околиці критичної точки, де виявляється різка аномалія всіх термодинамічних і транспортних властивостей флюїду, для проведення розрахунків кінетики екстракції необхідні дані по властивостям переносу. Особливий інтерес представляють коефіцієнти дифузії і коефіцієнт об'ємної в'язкості. Для визначення коефіцієнта дифузії застосовується метод Тейлора, однак при обробці експериментальних даних ухвалюється профіль Пуазейля, який характерний для ламінарного плину нестисливої рідини. Окремим завданням роботи було визначення профілю швидкості рідини в околиці критичної точки. Рішення диференційного рівняння руху для умов ламінарного ізотермічного плину флюїду в капілярі круглого перерізу дозволило отримати залежність для розрахунку локальної швидкості (12):

$$w(r) = \frac{C-D}{k^2} \left(1 - \frac{I_0(kr)}{I_0(kR)} \right)$$

де $C = \left(\frac{4}{3} + \frac{\eta'}{\eta} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$, $D = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz}$, $k^2 = \frac{G}{\nu A} \left(\frac{\partial \nu}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dz}$, I_0 – функція Бесселя уявного аргументу, η – коефіцієнт динамічної в'язкості, η' – коефіцієнт об'ємної в'язкості, w – локальна швидкість флюїду, p – тиск.

Рівняння (12) дозволяє отримати розподіл швидкості потоку по капіляру радіусом R при ламінарному режимі і може застосовуватися як для нестисливих, так і стисливих рідин. Коли рідина нестислива, розрахунки показують, що профіль швидкостей параболічний і повністю збігається за значеннями зі швидкостями, одержуваними по відомому рівнянню Пуазейля:

$$w(r) = -\frac{1}{4\eta} \frac{dp}{dz} (R^2 - r^2) \quad (13)$$

У безпосередній близькості до критичної точки, за даними розрахунків по залежності (12), форма профілю розподілу швидкостей все більше відхиляється від параболічної. Значна зміна форми профілю при стані рідини, що практично

збігається із критичною точкою, пояснюється прискоренням потоку на границі зі стінкою капіляра. Отримані теоретичні залежності доповнюють методіку розрахунків надкритичної екстракції з використанням мікрохвильового поля.

У четвертому розділі наведені результати експериментального дослідження сушіння зернових матеріалів із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. Досліджувалося сушіння зерна гречки, ячменя, вівса і пшениці. Початковий вологовміст зерна змінювався від 20% до 43%, початкова температура – від 17 °С до 26 °С, маса – від 0,05 до 1,2 кг, товщина шару – від $0,008$ до $0,07$ м, площа поверхні зразка, відкритої для видалення вологи – від $8 \cdot 10^{-3}$ до $94 \cdot 10^{-3}$ м², потужність магнетрона від 80 до 800 Вт. Вид кривих зміни вологовмісту і температури показав, що процес сушіння можна розділити на періоди, характерні для колоїдних капілярно-пористих тіл при інших способах підведення теплоти. Дані для всіх досліджених матеріалів можуть бути узагальнені у вигляді залежності швидкості сушіння від наведеного теплового потоку (рис. 5.б), тобто відносини корисного теплового потоку до маси зразка $q_m = \frac{Q_{\text{кор}}}{m}$, Вт/кг.

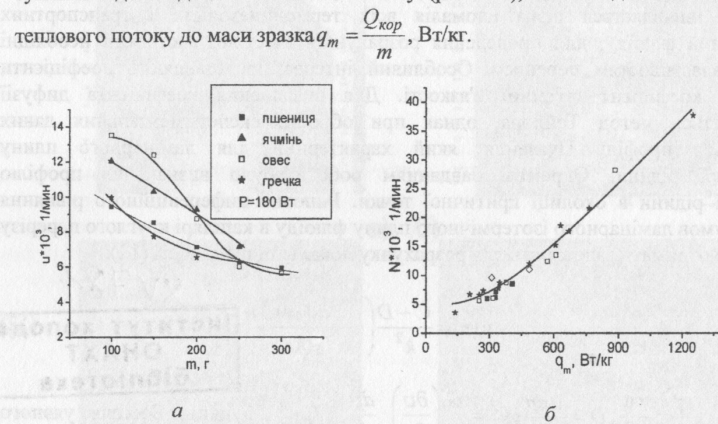


Рис. 5. Залежність швидкості сушіння зерна від маси завантаження (а) і наведеного теплового потоку (б). Вихідна потужність $P_{\text{вих}} = 180$ Вт.

Для всіх досліджених зернових матеріалів емпірична залежність швидкості сушіння від наведеного теплового потоку представлена у вигляді формули (14):

$$N = 1,53 \cdot 10^{-7} (q_m)^{1,17}, \text{ с}^{-1} \quad (14)$$

Для розрахунків корисного теплового потоку доцільно користуватися формулою, яка враховує споживану від мережі електроенергію P , ККД мікрохвильової камери η_k і ККД магнетрона η_m .

$$Q_{\text{кор}} = P \cdot \eta_k \cdot \eta_m, \text{ Вт} \quad (15)$$

Для розрахунків середньої температури зерна $\bar{t}_1$ в періоді постійної швидкості сушіння (першому періоді) рекомендована залежність, отримана за результатами експериментальних досліджень:

$$t_1 = 13,22 \cdot (q_m)^{0,28}, \text{ } ^\circ\text{С} \quad (16)$$

Залежності (14, 16) отримані для умов $200 \leq q_m \leq 1285$ Вт/кг та описують експериментальні дані із похибкою $\pm 15\%$ і $\pm 13\%$.

Експериментальні дані по інтегральним вологовмістам і температурам для всіх досліджених матеріалів оброблені у вигляді узагальнених кривих кінетики сушіння й нагрівання (рис.6) – залежностей безрозмірного поточного вологовмісту $\bar{u}/u_0$ і температури t/t_1 від безрозмірного комплексу $N\tau/u_0$. У цьому комплексі швидкість сушіння відповідає першому періоду.

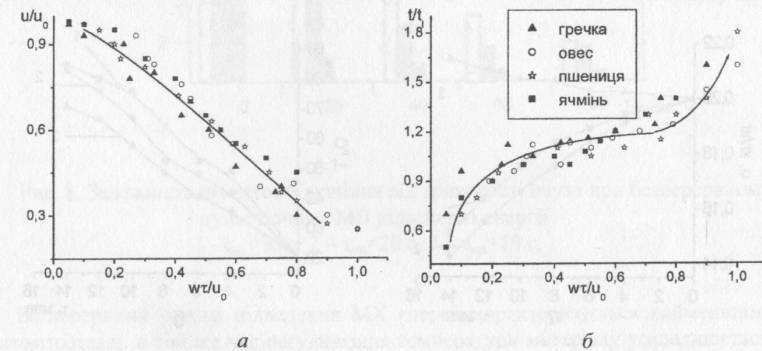


Рис. 6. Узагальнені криві вологовмісту (а) і температури (б).

Узагальнені криві вологовмісту та температури для ячменя, вівса, гречки і пшениці отримані при різних початкових вологовмістах, потужностях магнетрона, масах матеріалу. Відповідні рівняння, що описують усі періоди процесу сушіння досліджених культур при $0,036 \leq \frac{N\tau}{u_0} \leq 0,83$, мають вигляд:

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 1,016 - 0,332 \frac{N\tau}{u_0} - 1,449 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 1,091 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^3, \quad (17)$$

$$\frac{t}{t_1} = 0,511 + 3,506 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right) - 8,341 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 7,095 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^3 \quad (18)$$

Формули (17, 18) узагальнюють експериментальні дані з середньоквадратичною похибкою $\pm 9,8\%$ і $\pm 11,9\%$ відповідно. Тут $\bar{u}$ - середній вологовміст зерна в момент часу τ , u_0 - початковий вологовміст зерна, t - середня температура зерна в періоді постійної швидкості сушіння (першому періоді).

Таким чином, дані по кінетиці сушіння зернових можуть бути узагальнені єдиними рівняннями для всіх зернових, що використовувались в експерименті.

Дослідження динаміки сушіння щільного шару зернових матеріалів при мікрохвильовому нагріванні показало істотну неоднорідність по вологовмісту і температурі. Криві кінетики пошарового сушіння в умові вологоізоляції нижнього шару представлені на рис. 7, з яких видно, що найінтенсивніше сушіння протікало в середньому шарі. Вологознімання у верхньому шарі було повільніше. У той же час мікрохвильова енергія, що падає на верхній шар, перевищує за значенням мікрохвильову енергію, що проникає в нижні шари. Була виявлена ще одна особливість: вологовміст нижнього шару за часом підвищувався, досягаючи $0,215 \text{ кг/кг}$ (початковий вологовміст – $0,2 \text{ кг/кг}$).

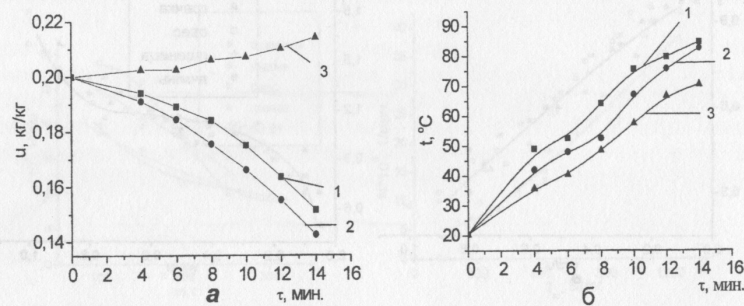


Рис. 7. Зміна локального вологовмісту (а) і температури (б).

Маса шару $m=0,1 \text{ кг}$, товщина $l=0,009 \text{ м}$, $P_{\text{вих}}=160 \text{ Вт}$.

1 – верхній шар, 2 – середній шар, 3 – нижній шар.

Подібна нерівномірність не спостерігалася при використанні сітчастої підстави.

З метою визначення, який спосіб підведення енергії (мікрохвильовий, мікрохвильово-конвективний, конвективний) для зазначених матеріалів і які режимні параметри забезпечують високу інтенсивність процесу сушіння і необхідну якість готового продукту при мінімальних енерговитратах, проведені дослідження в широкому діапазоні зміни режимних параметрів і для всіх можливих методах організації процесу. При обробці дослідних даних визначалися закономірності зміни середньоінтегральних вологовмістів і температур, швидкість сушіння, витрати енергії на 1 кг випарованої води.

При порівнянні мікрохвильового безперервного і пульсуючого сушіння визначено, що швидкість сушіння значно вище при безперервному підведенні енергії (рис.8). Швидкість сушіння в пульсуючих режимах тим більше залежить від тривалості паузи, чим більше тривалість періодів мікрохвильового нагрівання.

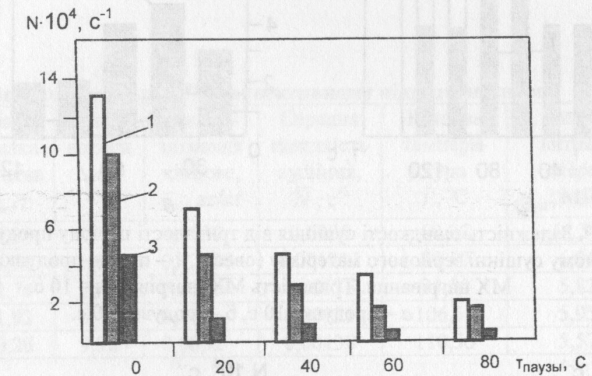


Рис. 8. Залежність швидкості сушіння від тривалості паузи при безперервному і пульсуючому МВ підведенні енергії
1 – $\tau_{\text{МВ}}=30 \text{ с}$, 2 – $\tau_{\text{МВ}}=20 \text{ с}$, 3 – $\tau_{\text{МВ}}=10 \text{ с}$.

Безперервний режим підведення МХ енергії характеризується найменшими енерговитратами, в той же час регулювання температури матеріалу ускладнюється. Проблема вирішується при використанні комбінованих методів. При пульсуючому сушінні основна маса води вилучається в періоди МХ нагрівання, а паузи дозволяють попередити перегрівання матеріалу. При організації пульсуючих режимів тривалість періодів МХ нагрівання залежить від вимог до допустимої температури матеріалу, а в періоди пауз рекомендується дотримуватися зниження температури не більше як на $3 \dots 5 ^\circ\text{C}$.

Результати розрахунків, проведених на підставі експериментальних досліджень сушіння зерна при МХ-конвективному циклічному підведенні енергії, представлені на рис. 9 – при продувці повітрям з температурою навколишнього середовища, та рис.10 – при продувці нагрітим до 50°C повітрям.

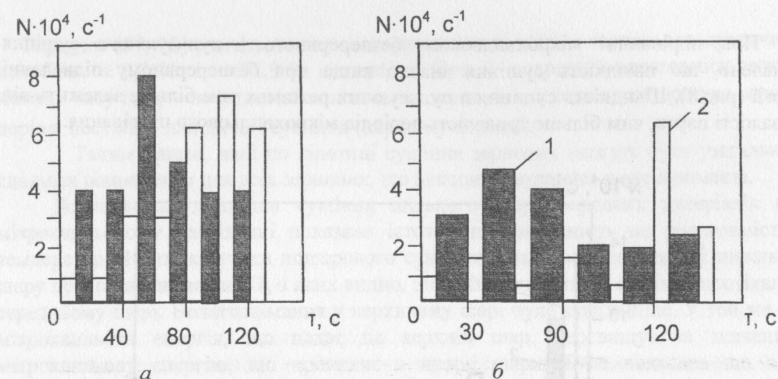


Рис. 9. Залежність швидкості сушіння від тривалості періоду продування при циклічному сушінні зернового матеріалу (овес). 1 – період продувки, 2 – період МХ нагрівання. Тривалість МХ нагрівання – 10 с.
а – продувка 10 с, б – продувка 20 с.

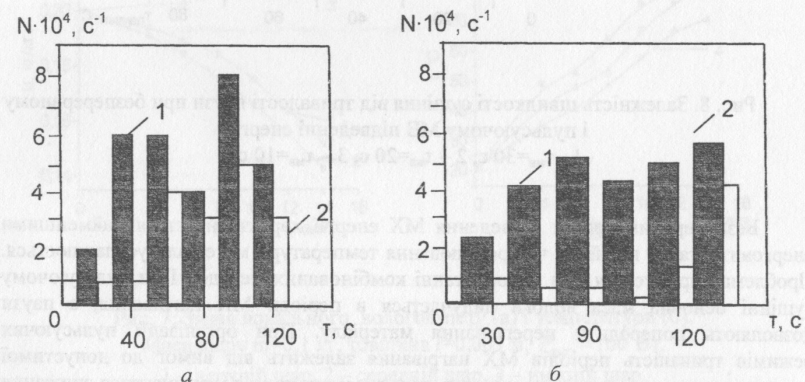


Рис.10. Залежність швидкості сушіння від тривалості періоду продування при циклічному сушінні зернового матеріалу (овес). 1 – період продувки, 2 – період МВ нагрівання. Тривалість МВ нагрівання – 10 с.
а – продування 10 с, б – продування 20 с.

При одночасному МХ-конвективному підводі енергії досліджувався вплив тривалості процесу, швидкості повітря, що продувається, температури, потужності магнетрона на кінцеву температуру, вологовміст і питомі витрати енергії. Матеріалом для дослідження, як і в попередніх дослідженнях, був овес, маса заміщення – 100 г, початковий вологовміст 20%. Продувка через шар повітря

одночасно з МХ нагріванням суттєво інтенсифікує міжкомпонентний тепло- та масообмін, прискорює вихід вологи з зернівок до поверхні. Як результат, суттєво знижується тривалість процесу сушіння та питомі енерговитрати. У табл. 2 наведені окремі результати розрахунків характеристик сушіння при одночасному мікрохвильово-конвективному підведенні енергії, отримані в наступних умовах: вихідна потужність магнетрона 600 Вт, температура повітря 19 °С, швидкість повітря 1,3 м/с.

Таблиця 2

Сушіння зерна при МХ-конвективному підведенні енергії

Тривалість τ , с	Маса зразка кінцева m_k , г	Збиток вологи Δm , г	Волого- знімання кінцеве, $\bar{u}_k$, кг/кг	Середня швидкість сушіння, $\bar{N}$, с ⁻¹	Кінцева темпера- тура $\bar{t}$, °С	Питомі витрати енергії $q_{уд}$, МДж/кг
30	98,30	1,70	0,1797	0,0006	69,27	11,54
60	93,98	6,02	0,12778	0,001211	89,10	6,04
70	92,74	7,26	0,1129	0,00135	94,00	5,82
80	91,92	8,09	0,103	0,00121	106,50	5,95
90	90,28	9,72	0,0832	0,00130	110,55	5,57

Характеристики мікрохвильово-конвективного сушіння, проведені для оцінки раціональності застосовності мікрохвильового нагрівання, отримані в ідентичних умовах і з однаковою масою матеріалу. З метою оцінки оптимальних умов для сушіння і зіставлення результатів із традиційним способом підведення теплоти, виконано три серії експериментів по конвективному сушінню. У першій досліджувався вплив температури повітря на інтенсивність сушіння і питомі енерговитрати при постійній витраті $G_{возд} = idem$ та при однаковій тривалості процесу $\tau = idem = 180$ с. У другій серії досліджень витрата повітря була змінною $G_{возд} = var$, його температура була постійною $t_{возд} = idem = 70$. Тривалість сушіння, як і в першій серії, становила 180 с. У третій серії досліджувався процес конвективного сушіння при температурах повітря 70 і 50 °С. Тривалість становила $\tau = 300$ с. Швидкість фільтрації $w = 1$ м/с. Після аналізу результатів експериментів для всіх режимів в обраних способах сушіння (мікрохвильовий безперервний, мікрохвильовий пульсуючий, мікрохвильово-конвективний циклічний, мікрохвильово-конвективний одночасний, конвективний) для кожного з обраного способу сушіння визначений оптимальний режим, результати наведені в табл.3. Визначено, що оптимальним є одночасний МХ-конвективний спосіб підведення енергії, при якому досягаються максимальна швидкість сушіння, мінімальні питомі витрати енергії і температура матеріалу не перевищує допустимого.

Таблиця 3

Характеристики процесів сушіння при різних способах підведення енергії

Режим підведення енергії	Швидкість сушіння, $N, \text{с}^{-1}$	Кінцева температура $t, ^\circ\text{C}$	Витрати енергії $Q_{\text{випр}}, \text{МДж/кг}$	$\frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{випр}}}$
МХ безперервний $\tau_{\Sigma} = 30 \text{ с},$ $N_c = 600 \text{ Вт}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	81,7	15,79	0,906
МХ-пульсуючий $\tau_{\Sigma} = 120$ $\text{с}, \tau_{MB} = \tau_n = 20, n = 3$ $N_c = 600 \text{ Вт}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	80,3	8,13	0,613
МХ-конвективний, циклічний $\tau_{\Sigma} = 130 \text{ с}, \tau_{MB} = \tau_k = 10$ $3, \tau_{\Sigma k} = 60 \text{ з}, \tau_{\Sigma MB} = 70$ $3, n = 6,5, t_g = 20 ^\circ\text{C},$ $w_g = 1 \text{ м/с}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	80,5	9,07	0,56
МХ-конвективний, одночасний $\tau_{\Sigma} = 60 \text{ с}, t_g = 19 ^\circ\text{C},$ $w_g = 0,9 \text{ м/с}$	$12,7 \cdot 10^{-4}$	71	5,65	0,73
Конвективний $\tau = 180 \text{ с}, w_g = 1,5 \text{ м/с},$ $t_g = 120 ^\circ\text{C}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	77	34,82	0,128

У п'ятому розділі наведені результати аналітичного дослідження температурного поля в матеріалі при нестационарному теплообміні в умовах дії внутрішніх джерел теплоти. Розрахунки температури в процесі сушіння при нагріванні винятково в мікрохвильовому полі по залежностям, що отримані як рішення рівняння теплопровідності тіл при дії внутрішніх джерел енергії, та представлені в безрозмірному вигляді, показали, що при $q_{v10} > 1,7 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$ характер зміни температури в тілі перестає відповідати фізичному процесу. Результати розрахунків отримані для умов мікрохвильового нагрівання при $t_{o.c.} < t_0$ (температура навколишнього середовища не перевищує початкову температуру матеріалу). Аналогічні проблеми виникали при роботі з рівняннями інших авторів. Спочатку було висловлене припущення, що некоректність рішень по наявних рівняннях у позначених областях зв'язана з структурою матеріалу (досліджувані тіла характеризуються неоднорідністю та анізотропією) і високою інтенсивністю підведення теплоти. У такому випадку рішення слід одержувати з диференціального рівняння теплопровідності гіперболічного типу. Однак високою є швидкість

нагрівання більше 100 К/с . У рамках даної роботи досліджуються процеси обробки рослинних матеріалів, у яких швидкість нагрівання значно нижче. Так, при обробці субстрату максимальна швидкість нагрівання становила $(dT/d\tau) \cong 0,56 \text{ К/с}$, при сушінні зернових $(dT/d\tau) \cong 0,45 \text{ К/с}$, максимальна швидкість нагрівання при екстрагуванні $(dT/d\tau) \cong 1,30 \text{ К/с}$. Результати аналітичних розрахунків середньої температури матеріалу в умовах дії внутрішніх джерел енергії, отримані з використанням залежності (19), показують принципову можливість застосування точних методів теорії теплопровідності для математичного опису процесів нагрівання у мікрохвильовому полі.

$$\bar{t} = t_{o.c.} + \frac{q_{v10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} e^{-\gamma_1 \tau} - \frac{q_{v10}}{\frac{\alpha F}{V} - \gamma_1 \rho c} e^{-\frac{\alpha F}{\rho c V} \tau} \quad (19)$$

У табл. 4 наведені результати розрахунків температури води при відсутності внеску негативного джерела теплоти ($q_{v20} = 0$). Розрахунки проводилися для $q_{v10} = 12,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$, коефіцієнт ослаблення $\gamma_1 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 12 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, об'єм, займаний матеріалом, $V = 10^{-4} \text{ м}^3$.

Таблиця 4

Значення розрахункової $\bar{t}_{\text{розн}}$ та експериментальної $\bar{t}_{\text{екс}}$ температури води при нагріванні в МХ полі. $P_{\text{вих}} = 180 \text{ Вт}$

№	$\tau, \text{мин}$	$\bar{t}_{\text{розн}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{екс}}, ^\circ\text{C}$
1	30	28,884	31,1
2	60	32,718	33,5
3	90	36,501	37,2
4	120	40,234	40,9
5	150	43,917	47,2
6	180	47,552	48,9
7	210	51,139	52,8
8	240	54,678	55,6
9	270	58,170	57,2
10	300	61,615	58,9

При розрахунках питомої потужності джерела враховувався ККД мікрохвильової камери η : $q_{v10} = P_{\text{вих}} \cdot \eta$.

Слід зазначити, що А.В. Ликов вказував умову для використання залежностей, що отримані для розрахунку температурного поля в тілі при дії внутрішніх джерел: $t_{o.c.} > t_0$. Аналіз результатів довів, що проблема некоректності рішень полягає не у формі оператора, а в особливостях моделювання процесу розповсюдження теплоти при нагріванні виключно внутрішніми джерелами.

Аналітичне розв'язання нестационарної задачі теплопровідності в тілі в умовах дії двох джерел теплоти (позитивний, обумовлений перетворенням енергії електромагнітного поля в теплову, і негативний, обумовлений стоком теплоти вологи, що випарувалася) отримане для наступних умов: шар матеріалу розглядається як напівобмежений стрижень із тепловою ізоляцією бічної поверхні при початковій температурі t_0 . У середині стрижня діє позитивне джерело тепла, обумовлене дією мікрохвильового поля, питома потужність якого q_{v1} , Вт/м³, і негативний, обумовлений випарюванням, з питомою потужністю q_{v2} . Приймаються граничні умови третього роду. Прийнято, що джерела тепла є експоненціальними функцією координати: позитивне $q_{v1} = q_{v10} \cdot e(-\gamma x)$ і негативне $q_{v2} = q_{v20} \cdot e(-\beta x)$, де q_{v10} – максимальна питома потужність позитивного джерела, Вт/м³, γ – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії в шарі, м⁻¹; q_{v20} – максимальна питома потужність негативного джерела, β – коефіцієнт ослаблення інтенсивності випару в шарі. Математична модель в диференціальному виді представлена рівняннями (20-23):

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{v1}}{c \cdot \rho} + \frac{q_{v2}}{c \cdot \rho} \quad (20)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_{\text{созд}}) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}, \quad (23)$$

де t – температура, x – поточна координата, τ – час, a , λ , c , ρ – відповідно коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності, питома теплоємність і щільність шару матеріалу; α – коефіцієнт тепловіддачі, q_{v1} – потужність позитивних джерел теплоти, q_{v2} – потужність негативних джерел теплоти.

Отримана залежність як результат розв'язання (20) з умовами однозначності (21-23) дозволяє розрахувати температурне поле в матеріалі в умовах дії мікрохвильового поля і враховує випарювання води. При розрахунках процесів сушіння слід задати швидкістю сушіння N , яке визначає значення негативного джерела: $q_{v20} = -\rho \cdot N \cdot r$ (r – питома теплота паротворення).

Моделювання мікрохвильового і мікрохвильово-конвективного сушіння дисперсних матеріалів у щільному шарі було проведено для сушарки, що представляє собою вертикальний канал, у який із завантажувального бункера надходить вологий дисперсний матеріал. У нижньому перетині каналу розташований випускний пристрій, що забезпечує рух матеріалу у вигляді щільного шару і його необхідну витрату. Через верхній перетин подається сушильний агент, який проходить через шар і видаляється з нижнього (вихідного) перетину. Зверху робочої камери розміщені магнетрони, що створюють заданий тепловий потік. За рахунок поглиненої вологими частками МХ енергії і теплоти, переданої йому від сушильного агента шляхом міжкомпонентного теплообміну, відбувається прогрів

часток і випарювання вологи. Висушений матеріал видаляється через випускний пристрій. Заданий вологовміст на виході забезпечується вибором режимних характеристик: потужності магнетронів, температури і швидкості сушильного агента, швидкості шару, а також висоти каналу. Щільний шар розглядається як двокомпонентна система, що складається із твердого (часток) і газового (сушильний агент) компонентів, між якими протікає міжкомпонентний тепломасообмін. Мікрохвильова енергія, що поглинається частками, враховується як позитивне внутрішнє джерело теплоти у твердому компоненті. Прийняті наступні допущення:

- властивості компонентів не залежать від температури і вологовмісту;
- МХ енергія, температури і швидкості компонентів розподілені по перетину каналу рівномірно;
- втрати теплоти через стінки каналу зневажливо малі.

За такими умовами температури компонентів змінюються тільки по висоті каналу, тобто температурні поля одновимірні.

Математична модель процесу теплопереносу включає рівняння енергії газового і твердого компонентів і граничні умови. Рівняння для ділянки падаючої швидкості сушіння при зневажливо малому повздовжньому переносі теплоти теплопровідністю представлені залежностями (24, 25):

$$\rho_z c_{pz} w_z (1 - \beta) \frac{d\vartheta_z}{dx} = \alpha_m a (\vartheta_m - \vartheta_z), \quad (24)$$

$$\rho_m c_m w_m \beta \frac{d\vartheta_m}{dx} = \alpha_m a (\vartheta_z - \vartheta_m) + q_{v1} e^{\gamma x} + q_{v2} e^{\beta x}, \quad (25)$$

де $\vartheta_z = t_z - t_{z0}$; $\vartheta_m = t_m - t_{z0}$; $\vartheta_{m0} = t_{m0} - t_{z0}$ – надлишкові температури компонентів; ρ – густина, кг/м³; c – теплоємність, Дж/(кгК); w – швидкість, м/с; β – щільність укладання шару; α_m – коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну, Вт/(м² К); x – повздовжня координата, м; $a = \frac{6\beta}{d}$ – питома поверхня часток, м²/м³; d – діаметр часток, м; q_{v10} , q_{v20} – потужність внутрішніх джерел теплоти у вхідному перетині, Вт/м³. Індеси: “ z ”, “ m ” ставляться до газу і часткам відповідно, 0 – значення на вході.

Граничні умови на вході: при $x = 0$: $\vartheta_z = \vartheta_{z0} = 0$; $t_m = t_{m0}$; $\vartheta_m = \vartheta_{m0}$.

Потужність джерела, обумовленого випарюванням вологи, визначається співвідношенням:

$$q_{v20} = \rho_w r \frac{du}{dt}, \text{ Вт/м}^3 \quad (26)$$

де ρ_w – густина шару сухого дисперсного матеріалу, кг/м³; r – питома теплота паротворення, Дж/кг; $\frac{du}{dt}$ – швидкість сушіння, с⁻¹.

Рішення системи рівнянь (24,25) із граничними умовами дозволило одержати залежності для розподілу температур компонентів на ділянці падаючої швидкості сушіння (27, 28):

$$\vartheta_z = -\frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} + \frac{B_1}{P_2} (\vartheta_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n}) e^{P_2 x} + \frac{H_1 B_1}{\gamma} \left[\frac{e^{\gamma x}}{(\gamma - P_2)} + \frac{1}{P_2} \right] + \frac{H_2 B_1}{\gamma} \left(\frac{e^{\beta x}}{\beta - P_2} + \frac{1}{P_2} \right) \quad (27)$$

$$H_2 = \vartheta_z + (\vartheta_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n}) e^{P_2 x} + \frac{H_1}{m - P_2} e^{\gamma x} + \frac{H_2}{n - P_2} e^{\beta x}, \quad (28)$$

де $B_1 = \frac{\alpha_m a}{\rho_z c_{pz} (1 - \beta) w_z}$, м^{-1} ; $B_2 = \frac{\alpha_m a}{\rho_m c_m \beta w_m}$, м^{-1} ; $H_1 = \frac{q_{v10}}{\rho_m c_m \beta w_m}$, К/м ,

$H_2 = \frac{q_{v20}}{\rho_m c_m \beta w_m}$, К/м ; $P_2 = -(B_1 + B_2)$ – корінь характеристичного рівняння.

Температури компонентів і темп їх зміни по висоті сушарки залежать від наступних факторів:

- продуктивності внутрішніх джерел теплоти (позитивного, обумовленого поглинанням мікрохвильової енергії вологими частками, і негативного, обумовленого витратою теплоти на випар вологи, тобто швидкістю сушіння), закону зміни продуктивності джерел по висоті;

- температур компонентів на вході;
- швидкостей компонентів;
- інтенсивності міжкомпонентного теплообміну;
- розміру часток;
- фізичних характеристик компонентів.

На ділянці постійної швидкості сушіння розподіл температур компонентів описуються залежностями:

$$\vartheta_z = \frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + H_1 \left[\frac{1}{P_2 (P_2 - \gamma)} e^{P_2 x} + \frac{1}{\gamma (\gamma - P_2)} e^{\gamma x} + \frac{1}{P_2 \gamma} \right] + H_2 \left(\frac{1}{P_2^2} e^{P_2 x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right) \quad (29)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_z + \vartheta_{m0} e^{P_2 x} + \frac{H_1}{\gamma - P_2} (e^{\gamma x} - e^{P_2 x}) - \frac{H_1}{P_2} (1 - e^{P_2 x}), \quad (30)$$

У випадку теплопереносу в рухомому шарі при мікрохвильовому сушінні без продування сушального агента, використовується однокомпонентна модель, згідно з якою щільний шар розглядається як квазігомогенне середовище з ефективними характеристиками: $\rho_{ш} = \rho_m \beta \bar{c}_{ш} = \rho_z c_{pz} (1 - \beta) + \rho_m c_m \beta \approx \rho_m c_m$,

Рівняння енергії шару для ділянки падаючої швидкості сушіння:

$$\rho_{ш} c_m w_{ш} \frac{d\vartheta_{ш}}{dx} = q_{v1} e^{\gamma x} + q_{v2} e^{\beta x} \quad (31)$$

Зміна температури шару по висоті каналу визначається залежністю:

$$\vartheta_{ш} = \frac{H_1'}{\gamma} (e^{\gamma x} - 1) + \frac{H_2'}{n} (e^{\beta x} - 1) \quad (32)$$

Для ділянки постійної швидкості сушіння ($n=0$) розподіл температури шару можна знайти з наступної формули:

$$\vartheta_{ш} = \frac{H_1'}{\gamma} (e^{\gamma x} - 1) + H_2' x, \quad (33)$$

У формулах (32, 33):

$$H_1' = \frac{q_{v1}}{\rho_{ш} c_{ш} w_{ш}}, \text{ К/м} \quad (34); \quad H_2' = \frac{q_{v2}}{\rho_{ш} c_{ш} w_{ш}}, \text{ К/м} \quad (35)$$

Для нерухливого шару при мікрохвильово-конвективному сушінні математична модель теплопереносу має вигляд:

$$\rho_z c_{pz} w_z (1 - \beta) \frac{d\vartheta_z}{dx} = \alpha_m a (\vartheta_m - \vartheta_z), \quad (36)$$

$$\alpha_m a (\vartheta_z - \vartheta_m) + q_{v1} e^{-\gamma x} + q_{v2} e^{-\beta x} = 0, \quad (37)$$

при $x = 0$: $\vartheta_z = \vartheta_{z0} = 0$; $t_m = t_{m0}$; $\vartheta_m = \vartheta_{m0}$.

Приймається наступне позначення для надлишкових температур компонентів: $\vartheta_z = t_z - t_{z0}$; $\vartheta_m = t_m - t_{z0}$; $\vartheta_{m0} = t_{m0} - t_{z0}$

Температури компонентів на ділянці падаючої швидкості сушіння описуються наступними рівняннями:

$$\vartheta_z = \frac{q_{v1}}{D} \left[-\frac{1}{\gamma} e^{\gamma x} + \frac{1}{\gamma} \right] + \frac{q_{v2}}{D} \left[-\frac{1}{\beta} e^{\beta x} + \frac{1}{\beta} \right] \quad (38)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_z + \frac{q_{v1}}{B} e^{mx} + \frac{q_{v2}}{B} e^{nx} \quad (39)$$

де $B = \alpha_m a$, $\text{Вт/м}^3 \text{К}$; $D = \rho_z c_{pz} w_z (1 - \beta)$, $\text{Вт/м}^2 \text{К}$.

Різниця температур компонентів в одному й тому ж перетині ($x=\text{idem}$):

$$\vartheta_m - \vartheta_z = \frac{q_{v1}}{B} e^{\gamma x} + \frac{q_{v2}}{B} e^{\beta x} \quad (40)$$

Залежності для температур компонентів на ділянці постійної швидкості сушіння ($\beta = 0$) приймають наступний вид:

$$\vartheta_z = \frac{q_{v1}}{D} \left[-\frac{1}{\gamma} e^{\gamma x} + \frac{1}{\gamma} \right] + \frac{q_{v2}}{D} x, \quad (41)$$

$$\vartheta_m = \vartheta_z + \frac{q_{v1}}{B} e^{\gamma x} + \frac{q_{v2}}{B}, \quad (42)$$

По наведеним залежностям проведені розрахунки температурного поля у шарі при різних умовах. У розрахунках змінювали швидкість сушильного агента $w_z = 0,2 \dots 2,0$ м/с, швидкість руху шару $w_m = 0,5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-3}$ м/с, діаметр часток $d = 3 \cdot 10^{-3} \dots 9 \cdot 10^{-3}$ м, значення позитивного $q_{v1} = 10^4 \dots 10^6$ Вт/м³ і негативного $q_{v2} = -10^4 \dots -10^6$ Вт/м³ джерел теплоти у твердому компоненті, коефіцієнт ослаблення мікрохвильової енергії в шарі $\gamma = -30 \dots 0$, $\beta = 0 \dots 6$. На рис. 11 представлений розподіл температур компонентів, з якого видно, що температура твердого компоненту зменшується при $x \geq 0,06$ м, що пояснюється суттєвим ослабленням потоку мікрохвильової енергії в шарі. Значення q_{v1} суттєво зменшується з ростом x , а вплив негативного джерела теплоти q_{v2} посилюється.

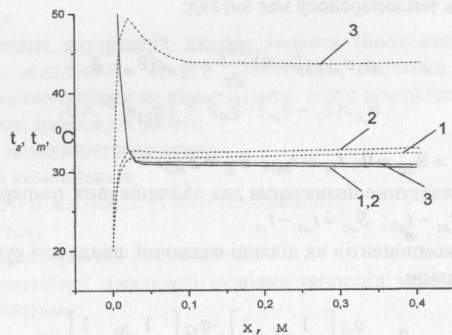


Рис. 11. Розподіл температур компонентів по висоті каналу при різних значеннях позитивного джерела теплоти

$w_z = 0,2$ м/с; $w_m = 0,001$ м/с;
 $q_{v2} = -10^5$ Вт/м³; 1 – $q_{v1} = 10^4$ Вт/м³; 2 – $q_{v1} = 10^5$ Вт/м³; 3 – $q_{v1} = 10^6$ Вт/м³
 --- частинки; — газ.

При збільшенні q_{v1} різниця температур компонентів на початковій ділянці зменшується, а з збільшенням q_{v2} температура росте. При зростанні швидкості газу на початковій ділянці збільшується як температура газу, так і температура частинок, а їх різниця за часом зменшується (при $x = idem$).

При збільшенні витрати теплоти на випарювання (збільшенні продуктивності негативного джерела q_{v2}) температури газу і часток стають нижче (у тому самому перетині, рис. 12). Ця залежність спостерігається при різних швидкостях, діаметрах часток, різних γ .

Для досліджених режимів зміна температур компонентів на початковій ділянці визначається в основному інтенсивністю міжкомпонентного теплообміну. На деякій відстані від вхідного перетину ці температури зближаються, темп і характер їх подальшої зміни залежать від продуктивності внутрішніх джерел теплоти. При досить високих значеннях q_{v10} температура часток стає вище температури газу, напрямок теплового потоку змінюється.

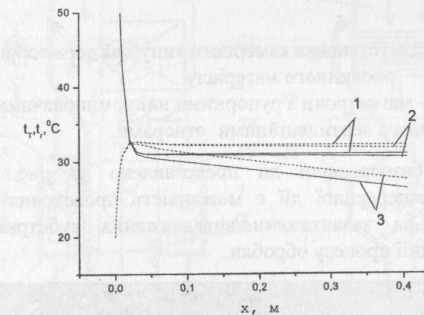


Рис. 12. Розподіл температур компонентів по висоті каналу при різних значеннях негативного джерела теплоти

$w_z = 0,2$ м/с; $w_m = 0,001$ м/с; $q_{v1} = 10^5$ Вт/м³; 1 – $q_{v2} = -10^4$ Вт/м³; 2 – $q_{v2} = -10^5$ Вт/м³; 3 – $q_{v2} = -10^6$ Вт/м³; $q_{v1} = \text{const}$; --- частинки; — газ.

Варіантні розрахунки дозволяють вибрати оптимальні режимні параметри при заданих вихідних даних, що забезпечують високу швидкість сушіння без перегріву матеріалу і оптимізувати конструкцію сушильної камери.

У шостому розділі наведені результати розробки і виготовлення мікрохвильових установок для промислового застосування, конструювання яких здійснювалось на основі базових даних по режимам роботи, визначеним в ході експериментальних та аналітичних досліджень. Фото мікрохвильової установки камерного типу (періодичної дії), виготовленої для термообробки рослинного матеріалу, представлено на рис.13. Установка розрахована на обробку 4 кг рослинного матеріалу (соломи) із вологістю 75%, тривалість обробки, при якій досягається стерилізація матеріалу та придбання їм якостей, потрібних для приготування субстрату під дереворуйнуючі гриби, складає 3 хв. Установка обладнана рупорними антенами з радіопрозорими фторопластовими пластинами для попередження попадання водяної пари з робочої камери в хвилевод.

Для максимального використання мікрохвильової енергії, що генерується магнетроном, магнетрони погоджуються з хвилеводом та хвилевод – з робочою камерою.

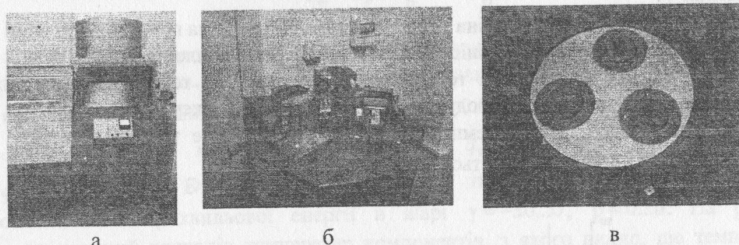


Рис.13. Мікрохвильова установка камерного типу для термообробки рослинного матеріалу.

а – загальний вид, б – магнетрони з рупорними випромінювачами, в – кришка з вентиляційними отворами.

Фото установки безперервної дії представлено на рис. 14. Основною перевагою установок безперервної дії є можливість проведення технологічного процесу без зупинок на завантаження/вивантаження субстрату, можливість максимальної автоматизації процесу обробки.

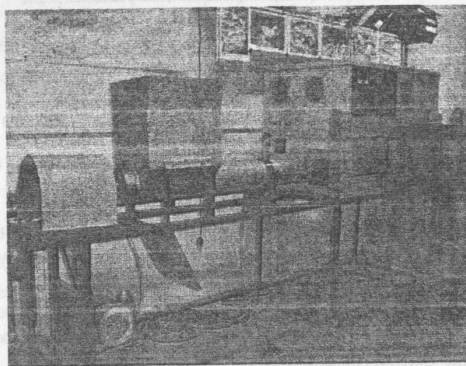


Рис.14. Мікрохвильова установка безперервної дії для обробки рослинного матеріалу.

Схема установки для мікрохвильово-конвективного сушіння дисперсних матеріалів у щільному рухомому шарі, розрахована з використанням залежностей, наведених у розділах 4-5, представлена на рис. 15. Установка містить засипний бункер 1, установлений над шахтною сушаркою 2. По обидві сторони сушарки розташовані відсіки 3, 4, у яких розміщені МХ модулі 5, що містять магнетрони 6, хвилеводи 7 і антени випромінювачі 8. Відсіки МХ модулів зроблені

вологонепроникними і відділені від внутрішнього простору сушарки 2 радіопрозорою перегородкою 9. МХ модулі обладнані системою примусового повітряного охолодження. Випромінювачі переважно рупорного типу, їх конструкція створює діаграму спрямованості ЕМП, яка забезпечує рівномірне опромінення поверхні матеріалу в сушарці без утворення тіньових зон. Під сушаркою 2 розташований контактний охолоджувач 10 висушеного матеріалу, а в нижній частині установки – випускний пристрій 11 для регулювання витрати і забезпечення руху матеріалу у вигляді щільного шару.

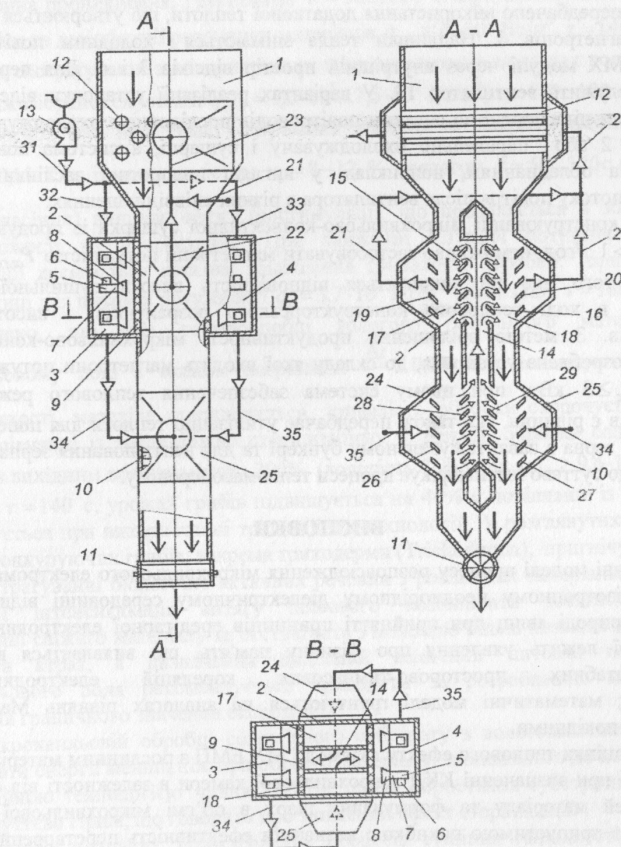


Рис.15. Установка для мікрохвильово-конвективного сушіння дисперсних матеріалів у щільному рухомому шарі, варіант послідовного підключення елементів.

У засипному бункері 1 розміщений рекуперативний трубчастий підігрівач вологого матеріалу 12. Охолоджувач 10, сушарка 2 і рекуперативний підігрівач 12 з'єднані між собою системою повітроводів для послідовного продування через них повітря вентилятором 13. У середній частині сушарки і охолоджувача виконаний вертикальний канал 14 для відведення повітря з охолоджувача 10 у сушарку 2. Бічні стінки сушарки і охолоджувача, звернені до повітряних каналів, виконані у вигляді жалюзі. Жалюзі можуть бути замінені на перфоровані ґрати або сітку. З метою підвищення енергетичної ефективності в запропонованій мікрохвильовій сушильній установці передбачено використання додаткової теплоти, що утворюється в процесі роботи магнетронів 6. Надлишки тепла знімаються холодним повітрям, яке продуває МХ модулі через внутрішній простір відсіків 3 і 4. Для переміщення повітря служить вентилятор 13. У варіантах реалізації установки відсіки 3 і 4 можуть бути підключені до системи повітроводів послідовно з охолоджувачем 10 і сушаркою 2 або паралельно охолоджувачу і сушарці, а система повітроводів забезпечена обладнанням, наприклад, у вигляді поворотної заслінки 30, для розподілу потоку повітря після вентилятора в різних співвідношеннях.

При конструюванні мікрохвильово-конвективної сушарки із продуктивністю більше $G > 1$ т/год, неможливо застосовувати магнетрони потужністю $P_{\text{вих}} \leq 1,5$ кВт внаслідок того, що не виконується відповідність висоти сушильної камери, одержаної в ході теплового конструкторського розрахунку, і висоти блоку магнетронів. З метою збільшення продуктивності мікрохвильово-конвективної сушарки розроблена установка, до складу якої входять магнетрони потужністю не менш $P_{\text{вих}} \geq 5$ кВт, при цьому система забезпечення теплового режиму для магнетронів є рідина, яка також передбачає утилізацію теплоти для попереднього нагрівання зерна в завантажувальному бункері та для вентилявання зерна в камері сушіння, що суттєво інтенсифікує процеси тепломасопереносу.

ВИСНОВКИ

1. Теоретичні моделі процесу розповсюдження мікрохвильового електромагнітного поля в анізотропному неоднорідному діелектричному середовищі відповідають фізичній природі явищ при прийнятті принципів ередітарної електродинаміки, в основі якої лежить уявлення про фізичну пам'ять, що виявляється внаслідок багатомасштабних просторово-тимчасових кореляцій електродинамічних параметрів; математичні моделі ґрунтуються на аналогах рівнянь Максвелла з дробовими похідними.
2. Методи оцінки теплового ефекту взаємодії МХ ЕМП з рослинним матеріалом, що застосовані при визначенні ККД мікрохвильової камери в залежності від фізичних властивостей матеріалу та формування шару в об'ємі мікрохвильової камери, дозволили з припустимою похибкою визначати ефективність перетворення енергії мікрохвильового поля. Рациональна організація шару здатна підвищити ККД камери при обробці зернових матеріалів до 15 %.
3. Встановлено, що збільшення температури щільного шару рослинного матеріалу від 20 °С до 80 °С приводить до зменшення коефіцієнту втрат ε'' на 33 % – для

соломи з вологовмістом 3,0 (вологістю 75%), для пшениці твердих сортів з вологовмістом 20% – на 9,4 % . Збільшення щільності соломи з вологістю 75 % від 300 кг/м³ до 450 кг/м³ збільшує значення ε'' на 56 %.

4. Встановлені умови інтенсифікації процесів тепломасопереносу в рослинних матеріалах при дії мікрохвильового електромагнітного поля з урахуванням вимог до кінцевого продукту. Так, при обробці насіння у режимі біостимуляції максимальний ефект досягається при значенні питомої потужності мікрохвильового поля $q_{\text{v10}} = 5,5 \cdot 10^5 \dots 7,5 \cdot 10^5$ Вт/м³, формуванні шару матеріалу товщиною не вище $\delta = 2\Delta$, де Δ – глибина проникнення, і експозиції $\tau = 50 \dots 120$ с. При застосуванні методів термообробки та дезінфекції рослинних матеріалів $q_{\text{v10}} \cong 8 \cdot 10^5$ Вт/м³, $\tau = 140 \div 180$ с, $\delta \cong 4\Delta$; при екстрагуванні з використанням мікрохвильового поля для попередньої обробки свіжозібраної сировини $q_{\text{v10}} = 5,0 \cdot 10^5 \dots 7,5 \cdot 10^5$ Вт/м³, $\tau = 150 \dots 180$ с.

5. Визначено, що при темпі нагрівання насіння в мікрохвильовій камері $\frac{\Delta T}{\tau} = 0,14 - 0,15$ К/с із вологовмістом $u_0 = 8 - 12$ % протягом $\tau = 50 \dots 120$ с (залежно від сорту насіння) виникає ефект біостимуляції, що проявляється в збільшенні енергії схожості та проростання. При зниженні питомої потужності ефект біостимуляції досягається шляхом збільшення тривалості обробки: при обробці зерна пшениці для питомої потужності $q_v = 3,7 \cdot 10^4$ Вт/м³ експозиція $\tau = 180$ с.

6. Визначено, що при термообробці вологого рослинного матеріалу в мікрохвильовому полі з темпом нагрівання $\frac{\Delta T}{\tau} \geq 0,33$ К/с поліпшуються його

живильні якості, матеріал стерилізується, тривалість обробки скорочується в 45 разів у порівнянні із традиційною стерилізацією. У режимі обробки солом'яного матеріалу з вихідним вологовмістом 300% (вологість 75%) при $q_{\text{v10}} \geq 9,6 \cdot 10^5$ Вт/м³, експозиції $\tau = 140$ с, урожай грибів підвищується на 40% у порівнянні із урожаєм, що одержується при використанні традиційних технологій. У розглянутих режимах розвиток конкуруючих грибів, зокрема триходерми (Trichoderma), пригнічується.

7. При екстрагуванні біологічно активних речовин з рослинних матеріалів під дією МХ ЕМП інтенсифікація витягу цільового компонента досягається при використанні свіжого матеріалу та екстрагента з можливо більш низьким значенням коефіцієнта втрат, а визначення доцільної величини питомої потужності мікрохвильового поля рекомендується проводити за розробленою методикою розрахунків граничного значення експозиції.

8. При мікрохвильовій обробці солом'яного субстрату з вологовмістом не вище 20 % витрати енергії менші, ніж при обробці матеріалу, зволоженого до необхідного за традиційною технологією рівня 73-75%, однак обростання субстратних блоків міцелієм суттєво гірше, що говорить про знижений ефект стерилізації.

9. Зіставлення основних характеристик процесів сушіння (швидкості сушіння, температур матеріалу, питомих витрат енергії, ефективності використання підведеної енергії) при різних способах підведення енергії дозволило встановити, що оптимальним є одночасний МХ-конвективний спосіб підведення, при якому

швидкість сушіння втричі вище, а питомі енерговитрати на 40% нижче, ніж при пульсуючому МХ підведенні. Продувка холодного або нагрітого повітря через шар забезпечує інтенсифікацію міжкомпонентного тепломасообміну, активний випар вологи, що дифундує з обсягу зернівки до її поверхні, збільшує швидкість сушіння, запобігає перегріву матеріалу, знижує сумарні та питомі витрати енергії.

10. Зміна безрозмірних середньоінтегральних вологовмістів у процесах сушіння при всіх досліджених способах і режимах описуються одним узагальненим

рівнянням $\frac{u}{u_0} = f\left(\frac{N\tau}{u_0}\right)$, що свідчить про ідентичність закономірностей кінетики

сушіння незалежно від способів підведення енергії.

11. Вплив виду зерна з ряду досліджених (пшениця, овес, ячмінь, гречка) при масі завантаження $m > 0,2$ кг на швидкість сушіння й середню температуру в першому періоді зневажливо малий. Швидкість сушіння описується універсальною експериментальною залежністю з погрешністю $\pm 15\%$, середня температура описується залежністю з погрешністю $\pm 13\%$ для діапазону $200 \leq q_m \leq 1285$ Вт/кг.

12. Отримано, що математична модель процесу сушіння адекватно описує явища переносу теплоти та вологи при врахуванні двох внутрішніх джерел теплоти, позитивного, який визначається дією мікрохвильового поля, та негативного, дія якого пов'язана з випаром вологи. Аналітичні рішення для розрахунків температури матеріалу задовільно корелюються з експериментальними при високих значеннях питомої потужності внутрішніх джерел теплоти ($q_v \leq 1,3 \cdot 10^6$ Вт/м³).

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Дайтерс, У.К. Модель для расчета профиля скоростей течения сжимаемой жидкости в капилляре [Текст] / У.К. Дайтерс, И.Л. Бошкова // Холодильная техника и технология. – 1999. – Вып. 63. – С. 18-20. *Дисертанту належать основні ідеї статті та обробка результатів.*
2. Бошкова, И.Л. Ламинарное течение сверхкритических флюидов в капиллярах / И.Л. Бошкова, У.К. Дайтерс, В.А. Мазур // Холодильная техника и технология. – 1999. – Вып. 66. – С. 56-60. *Дисертанту належить математична модель руху флюїдів в околиці критичної точки.*
3. Механизм воздействия микроволнового электромагнитного поля (МВЭМП) на биологическую ткань растительных организмов [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, О.В. Бабаянц, Е.А. Левченко // Хранение и переработка зерна. – 2001. – № 3 (21). – С. 29-32. *Дисертанту належить основна гіпотеза механізму впливу МХ поля на рослину тканину та розробка методики дослідження.*
4. Технологія мікрохвильової обробки насіння сільськогосподарських культур. Методичні рекомендації [Текст] / Тучний В.П., Калінін Л.Г., Бошкова И.Л. та ін. – К.: Аграрна наука. 2002. – 45 с. *Дисертанту належить узагальнення результатів та розрахунки мікрохвильового пристрою для обробки.*

5. Калинин, Л.Г. Исследование возможностей нового метода предпосевной обработки семян на основе эффектов микроволнового и низкочастотного электромагнитного поля [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Г.И. Панченко // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник Харківського державного університету сільського господарства. – Харків, 2003. – с. 132-138. *Дисертанту належить проведення експериментальних досліджень та їх аналіз.*

6. Калинин, Л.Г. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова // Биофизика. – 2003. – Т.48, вып.1. – С.122-124. *Дисертанту належить основна гіпотеза виникнення ефекту біостимуляції насіння під впливом МХ поля та її обґрунтування.*

7. Калинин, Л.Г. Разработка микроволновых сушилок для зерна [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Хранение и переработка зерна. – 2004. – № 7. – С. 34-35. *Дисертанту належать основні ідеї статті та обробка результатів.*

8. Перспективи впровадження мікрохвильової технології до промислового вирощування грибів [Текст] / Коломійчук С. Г., Бошкова И. Л., Калінін Л. Г., Бошкова О. Л] // Обладнання та технології харчових виробництв. Донецьк: ДонДУЕТ, 2005. – Т.2, вип.13. – С. 170 – 177. *Дисертанту належить аналіз експериментальних даних та проведення теплових розрахунків.*

9. Калинин, Л.Г. Сушка гречихи при различных способах подвода теплоты [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева // Хранение и переработка зерна. – 2005. – № 6(72). – С. 28-31. *Дисертанту належить складання методики експериментів, участь в їх проведенні та аналіз даних.*

10. Калинин, Л.Г. Исследование тепловых процессов при микроволновом нагреве дисперсных материалов / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева [Текст] // ТриО. – Одесса, 2005. – С. 7-12. *Дисертанту належить складання методики експериментів, участь в їх проведенні та аналізі.*

11. Календерьян, В.А. Кинетика микроволновой сушки сыпучего органического материала / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева [Текст] // Инж.-физ. журн. – 2006. – №3. – 79. – С. 123-127. *Дисертанту належить аналіз експериментальних даних та отримання емпіричних залежностей.*

12. Настоящее и будущее микроволновой технологии [Текст] / В.П. Тучный., В.М. Иванов, Н.Н. Гаврилюк, И.Л.Бошкова // Хранение и переработка зерна. – 2006. – №6(84). – С. 20-22. *Дисертанту належить дослідження росту рослин з насіння, обробленого МХ полем, та формулювання висновків.*

13. Бошкова, И.Л. Тестирование качества соломенного субстрата для выращивания вешенки с использованием физиологических показателей прорастания семян [Текст] / И.Л. Бошкова, С.Г. Коломийчук // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – Донецк, 2006. – Вып.6. – С. 183-187. *Дисертанту належить проведення експериментів на субстраті та теплові розрахунки.*

14. Совмещение микроволновой обработки с линией экстрагирования растительного масла [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, В.П. Тучный, Е.А. Левченко // Деловой агрокомпас. – 2006. – №6(116). – С. 48-49. *Дисертанту належить основна*

ідея роботи, складання методик та проведення експериментів по екстрагуванню олій з шроту, аналіз даних.

15. Календерьян, В.А. Кинетика кондуктивной и кондуктивно-конвективной сушки гречихи [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Наукові праці ОНАХТ. – О.: ОНАХТ, 2006. – Т.2, № 29 – С.17-20. *Дисертанту належить аналіз експериментальних даних та формулювання висновків.*

16. Калинин, Л.Г. Разработка микроволновой технологии подготовки субстрата для дереворазрушающих грибов [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Г.И. Панченко, С.Г. Коломийчук // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры, научно технический сборник. – 2007. – Вып. 1. – С. 100-104. *Дисертанту належить формулювання мікрохвильової технології підготовки субстрату для дереворуйнівних грибів.*

17. Бошкова, И.Л. Новая технология приготовления субстрата для дереворазрушающих грибов [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Аграрний вісник Причорномор'я. Збірник наукових праць. Сільськогосподарські та біологічні науки. – 2008. – Вип. 43. – С. 105-107. *Дисертанту належить удосконалення технології підготовки субстрату.*

18. Календерьян, В.А. Сушка зерновых культур в плотном слое с применением микроволнового поля [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Хранение и переработка зерна. – 2008. – №1. – С. 16-18. *Дисертанту належить складання методик, проведення експериментів та участь в формулюванні висновків.*

19. Календерьян, В.А. Теплоперенос в процессе сушки плотного слоя дисперсного материала при микроволновом подводе энергии [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Наук. пр. / НУХТ. – К., 2008. – № 25. – Ч.2. – С. 94-95. *Дисертанту належить складання аналітичної моделі розрахунку процесу сушіння.*

20. К оценке эффективности сушки зерновых культур в неподвижном слое при различных режимах подвода энергии [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Дементьева // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2008. – Вип.39, т.2. – С. 211-215. *Дисертанту належать проведення розрахунків основних характеристик сушіння та їх зіставлення.*

21. Бошкова, И.Л. Дослідження діелектричних характеристик зернових культур [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Г.И. Панченко // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2009. – Вип. 36, т.1. – С. 83-86. *Дисертанту належить аналіз експериментальних даних.*

22. Бошкова, И.Л. Вивчення термічних явищ при взаємодії глини з мікрохвильовим полем [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Ю.В. Корнієнко // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2009. – Вип. 35, т.1. – С. 8-10. *Дисертанту належить основна ідея досліджень та проведення теплових розрахунків.*

23. Доцільність мікрохвильового екстрагування біологічно активних речовин як природних пестицидів з рослинної сировини [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, С.Г. Коломийчук, Т.Ю. Дементьева // Обладнання та технології харчових виробництв. – Донецьк: ДонНУЕТ. – 2010. – Вип. 24. – С. 146-153. *Дисертанту належить основна ідея статті та розробка плану досліджень.*

24. Календерьян, В.А. Влияние режимных параметров на распределение температур в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке [Текст] // В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32, №1. – С. 37-44. *Дисертанту належать складання методики розрахунку температур рухомого шару дисперсного матеріалу при мікрохвильово-конвективному сушінні, проведення розрахунків.*

25. Календерьян, В.А. Сравнительная оценка данных по сушке плотного слоя зернового материала [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., – 2010. – Вып. 38, т.1, – С. 143-147. *Дисертанту належить основна ідея роботи та аналіз розрахункових даних.*

26. СВЧ сушка зерна [Текст] / С.В. Зверев, Бошкова И.Л., Н.В. Волгушева, Т.Ю. Дементьева // Хранение и переработка зерна. – 2011. – № 10(148). – С. 67-69. *Дисертанту належить проведення та узагальнення експериментальних даних.*

27. Календерьян, В.А. Теплоперенос в аппаратах с плотным дисперсным слоем [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова. К.: Слово, 2011. – 184 с. *Дисертанту належить спільне написання монографії.*

28. Бошкова, И.Л. Развитие энергосберегающей сушилки для зерна на основе микроволнового подогрева [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Дементьева. // Южно-Уральский государственный университет ТЭПРБП. Челябинск, 2013. – С. 365-368. *Дисертанту належить розробка схеми мікрохвильово-конвективної сушилки та аналіз її розрахунків.*

29. Метод получения биопестицидов и устройство для его реализации [Текст] / [И.Л. Бошкова., Т.Ю. Дементьева, Е.В. Георгиеш, С.Г. Коломийчук] // Обладнання та технології харчових виробництв. Темат. Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2013. – Вип. 31. – С. 15-22. *Дисертанту належить проробка мікрохвильового пристрою для екстрагування біологічно активних речовин.*

30. Використання біологічних тестів для оцінки ефективності мікрохвильового екстрагування біологічно активних речовин [Текст] / С.Г. Коломийчук, И.Л. Бошкова, Т.В. Коломийчук, К.В. Георгієш // Аграрний вісник Причорномор'я, Біологічні науки: Зб. наук. праць. – Одеса: ОДАУ, 2013. – Вип. 70. – С. 50-55. *Дисертанту належить участь в проведенні тестування та аналізі даних.*

31. Измерение диэлектрических характеристик растительных материалов [Текст] / И.Л. Бошкова, Т.Ю. Дементьева, Е.В. Георгиеш, С.Н. Колобков // Холодильная техника та технологія, Одеса. – О.: ОНАХТ, 2013. – Вип.2. – С. 28-31. *Дисертанту належить аналіз проведення вимірів діелектричних властивостей соломки та зерна.*

32. Бошкова, И.Л. Динамика сушки плотного слоя зерновых материалов при микроволновом нагреве [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Дементьева // Пищевая промышленность: наука и технологи. Науч.-практ. центр нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2014. – № 2(24). – С. 74-79. *Дисертанту належать ідея статті, аналіз експериментальних даних та формулювання висновків.*

33. Бошкова, И.Л. Аналитические модели расчета температуры в материале при действии внутренних источников теплоты [Текст] / И.Л. Бошкова, Е.В. Георгиеш // Актуальні проблеми енергетики та екології. Зб. наук. праць. – Одеса: ОНАХТ, 2014. – Вип. 45. – Т. 1. – С. 33-38. *Дисертанту належить формулювання ідеї роботи, напрямків досліджень та аналіз розрахункових температур.*

Публікації апробаційного характеру:

1. Вивчення деяких фізіолого-біохімічних показників насіння рослин за дії низькочастотного і високочастотного електромагнітного поля / Калінін Л. Г., Коломійчук С. Г., Леус М.І., Бошкова І. Л., Панченко Г.І. [Текст] // Онтогенез рослин у природному та трансформованому середовищі. Фізіолого-біохімічні та екологічні аспекти. Тези II Міжнародної конференції. Львів. 18-21 серпня 2004. – С. 109. *Дисертанту належить планування і проведення досліджень впливу електромагнітного поля низькочастотного та мікрохвильового діапазону на насіння.*
2. Календерьян, В.А. Сушка плотного слоя гречихи в микроволновом поле [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева, Т.Ю. Дементьева // Тезисы докладов V международной научно-практической конференции "Хлебопродукты-2005". 4-16 сентября 2005. – С. 27. *Дисертанту належать аналіз експериментальних даних.*
3. Бошкова, И.Л. Моделирование распределения скорости флюида в околокритическом состоянии [Текст] / И.Л. Бошкова, А.П. Угольников, У.К. Дайтерс // Четвертый семинар "Информационные системы и технологии". Сборник научных трудов. Одесса. – 19-20 октября 2006. – С. 110-115. *Дисертанту належить складання математичної моделі та розробка розрахункових програм на MAPLE V.*
4. Календерьян, В.А. Кинетика микроволновой сушки зерновых культур [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену, Минск, 2008. – С. 204-205. *Дисертанту належить проведення розрахунків та аналіз результатів.*
5. Календерьян, В.А. Температурное поле в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // IV Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 19-23 мая 2008. – С. 204-205. *Дисертанту належить викладення основних залежностей для розрахунку температурного поля при сушінні рухомого шару зернового матеріалу.*
6. Бошкова, И.Л. Математическое исследование распределения скоростей в потоке сжимаемой жидкости [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.П. Угольникова, Т.Ю. Дементьева // Sciences, Engineering and Humanities for Energy Worlds. Book of Abstracts. – Odessa. May 27-30 2009. – P. 57-59. *Дисертанту належить основна ідея роботи, розробка розрахункових програм та аналіз даних*
7. Калинин, Л.Г. Влияние микроволнового электромагнитного поля на семена агрокультур. [Текст] / Л.Г. Калинин, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева // Комплексное использование биоресурсов: малоотходные технологии: материалы Международной научно-практической конференции, 11-12 марта 2010 г. – Краснодар : гос. научн. Учреждение НИИ хранения и перераб. с.-х. продукции, 2010. – С. 74-78.

Дисертанту належить участь в проведенні експериментів по впливу МХ поля на посівні якості насіння сільськогосподарських культур та аналіз даних.

8. Календерьян, В.А. Установка для микроволново-конвективной сушки дисперсных материалов в движущемся слое [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В.Волгушева // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов : материалы Международного научно-технического семинара, г. Воронеж, 11-13 мая 2010 г. – Воронеж: ВГЛТА, 2010. – С. 505-514. *Дисертанту належить схемне рішення установки для сушіння дисперсних матеріалів та її розрахунки.*
9. Бошкова, И.Л. Расчет охладителя для сушки зерновых материалов [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Дементьева // Современные проблемы холодильной техники и технологии: тезисы докладов ОНАПТ, 17-20 мая. – Одесса: вид. центр ОНАПТ, 2011. – С. 132-133. *Дисертанту належить складання методики розрахунку та участь в їх проведенні.*
10. Бошкова, И.Л. Исследование процессов микроволнового экстрагирования / И.Л. Бошкова, Е.В. Георгиеш, С.Г. Коломийчук // Актуальні питання біологічної фізики та хімії: матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції БФФХ-2013, 22-26 квітня 2013 р. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 111-112. *Дисертанту належить складання розрахункових програм та аналіз даних.*
11. Социально-экологические проблемы применения пестицидов и пути их решения. Медико-биологический аспект [Текст] / Коломийчук С.Г., Бошкова И.Л., Коломийчук Т.В., Георгиеш Е.В. // Современные проблемы физики, химии и биологии: материалы II Международной науч.-техн. конф., 27-29 ноября 2013 г. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 129-132. *Дисертанту належить проведення експериментів по екстрагуванню біологічно активних речовин з плодів тїл Шїї-таке та обговоренні результатів по визначенню антиокислювальної дії екстрактів на гризунах.*
12. Бошкова, И.Л. Разработка конструкции и расчет рупорного излучателя микроволновой энергии [Текст] / И.Л. Бошкова, Е.Н. Колобков, Н.П. Угольникова // Перспективні напрямки української науки. Періодичні та точні науки. 36. статей учасників 19-й Всеукр. наук.-пр. конф., 2013. – Запоріжжя: 2013. – Т.2. – С. 65-67. *Дисертанту належать розрахунки рупорного випромінювача та визначення геометричних характеристик.*
13. Бошкова, И.Л. Математична модель процесу теплопровідності для щільного шару матеріалу при нагріванні в мікрохвильовому полі [Текст] / И.Л. Бошкова // Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій "Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості", 13-17 жовтня 2014 р. – К.: НУХТ, 2014. – с. 544.

Патенти

1. Пат. №19549 України, A01c1/00. Спосіб передпосівної обробки насіння сільськогосподарських рослин [Текст] / Калінін Л.Г., Моїсєєв В.Ф., Бошкова І.Л., Панченко М.І. – u200607445; заявл. 04.07.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. №12. – 6 с. *Дисертанту належать розрахунки тривалості експозиції насіння МХ енергією в промисловій камері, при яких досягається режим біостимуляції.*
2. Пат. №19550 України, A01c1/00. Мікрохвильовий пристрій передпосівної обробки насіння [Текст] / Калінін Л.Г., Моїсєєв В.Ф., Бошкова І.Л., Панченко М.І. – u200607446; заявл. 04.07.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12. – 2 с. *Дисертанту належать розрахунки вібротранспортеру та розробка схемного рішення МХ установки для обробки насіння в безперервному режимі.*
3. Пат. № 38205 України, F26B 17/12, H05B 6/64. Установка для мікрохвильово-конвективного сушіння дисперсних матеріалів у щільному рухомому шарі [Текст] / [В.О. Календер'ян, І.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева] – u200809907; заявл. 29.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. – 6 с. *Дисертанту належать розрахунки двох схем сушарок, з паралельним та послідовним включенням повітропроводів.*
4. Пат. №34010 України, H05B 6/64. Конвейерна мікрохвильова установка [Текст] / Панченко Г.І., Маліновський В.В., Кольчак В.В., Бошкова І.Л., Калінін Л.Г., Шабля О.П. – u2008 01900; заявл. 14.02.2008; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14. – 3 с. *Дисертанту належать проведення експериментів та розрахунки мікрохвильової камери.*
5. Пат. №35537 України, H05B 6/64. Камерна мікрохвильова установка [Текст] / Маліновський В.В., Панченко Г.І., Бошкова І.Л., Калінін Л.Г., Кольчак В.В., Черкасов С.В. – u200804737; заявл. 14.04.2008; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 3 с. *Дисертанту належить конструювання вузла завантаження мікрохвильової установки та визначення доцільної швидкості руху рослинного матеріалу в робочій камері.*
6. Пат. №42526 України, H05B 6/64. Мікрохвильова сушильна установка [Текст] / Шатравка О.М., Моїсєєв В.Ф., Календер'ян В.А., Бошкова І.Л., Волгушева Н.В. – 200900968; заявл. 09.02.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. №13. – 5 с. *Дисертанту належить схемне рішення мікрохвильової сушарки з повітряним охолодженням блоків магнетронів.*
7. Пат. №95739 України, F26B 17/12, H05B 6/64. Мікрохвильова конвективна сушарка для сипких матеріалів [Текст] / Бошкова І.Л., Георгієш К.В., Демет'єва Т.Ю., Угольникова Н.П. – u201405855; заявл. 30.05.14; опубл. 12.01.2015, Бюл. №1. – 5 с. *Дисертанту належить схемне рішення мікрохвильової сушарки з рідинним охолодженням блоків магнетронів.*

АНОТАЦІЯ

Бошкова І.Л. Інтенсифікація процесів тепломасопереносу в рослинних матеріалах при дії мікрохвильового електромагнітного поля: – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика". – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2015.

У дисертаційній роботі на підставі експериментальних та теоретичних досліджень ефектів дії мікрохвильового електромагнітного поля на рослинні матеріали різних видів (зерно, стебла та інші частини рослин) визначені умови, за якими у рамках кожного з досліджуваних методів, заснованих на застосуванні мікрохвильової енергії (біостимуляція, термообробка, екстрагування, сушіння) очікується максимальний позитивний ефект, що полягає в інтенсифікації процесів переносу теплоти та маси. Проведений широкомасштабний аналіз впливу різних факторів (вид рослинного матеріалу, потужність мікрохвильового джерела, експозиція, маса й форма матеріалу, що завантажується, початковий вологовміст та ін.) на якісні характеристики кінцевого матеріалу та питомі витрати енергії. Встановлено, що інтенсифікація процесів переносу в умовах дії мікрохвильового поля визначається особливостями будови рослинної тканини та темпом нагрівання. Проведені дослідження кінетики сушіння зернових культур при мікрохвильовому (безперервному та пульсуючому), конвективному і мікрохвильово-конвективному (циклічному та одночасному) підводі енергії та різних режимах привели до висновку, що оптимальним є одночасний МХ-конвективний спосіб підведення енергії, при якому досягаються максимальна швидкість сушіння, мінімальні питомі витрати енергії і температура матеріалу не перевищує допустимі. Обґрунтовано застосування рівнянь параболічного типу для опису явищ теплопровідності в умовах мікрохвильового нагрівання, що в першу чергу пов'язано з відносно низькою інтенсивністю нагрівання рослинного матеріалу. На підставі аналізу та узагальнення експериментальних даних, проведення варіативних розрахунків по розробленим аналітичним моделям нагрівання та сушіння рослинних матеріалів, сконструйовані установки для мікрохвильово-конвективного сушіння зерна у щільному рухомому шарі, мікрохвильовій термообробці рослинного субстрату та біостимуляції насіння в мікрохвильовому полі.

Ключові слова: мікрохвильове електромагнітне поле, інтенсифікація, математична модель теплопереносу, внутрішні джерела теплоти, питома потужність, біостимуляція, сушіння, екстрагування, рослинна тканина, мікрохвильові установки.

АННОТАЦІЯ

Бошкова І.Л. Интенсификация процессов тепломассопереноса в растительных материалах при действии микроволнового электромагнитного поля: – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2015.

В диссертационной работе на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании растительных материалов различных видов (зерно, стебли и другие части растений) определены условия, при которых в рамках каждой из разрабатываемой технологий (биостимуляция, термообработка, экстрагирование, сушка) ожидается максимальный положительный эффект, заключающийся в

интенсификации переноса теплоты и массы под действием микроволнового электромагнитного поля с учетом требований к качеству конечной продукции. Разработан комплексный подход к оценке явлений, вызываемых в материалах растительного происхождения при воздействии микроволнового электромагнитного поля, в основе которого лежат: анализ тепловых эффектов взаимодействия микроволнового поля с полярными диэлектриками, формирование представлений об особенностях нагрева в микроволновом поле с учетом строения клеток и проводящей системы растений, обобщение данных экспериментальных исследований и получение моделей, учитывающих качественное развитие связей процессов переноса со структурными изменениями и физическими параметрами. Проведен широкомасштабный анализ влияния различных факторов (вид растительного материала, мощность микроволнового источника, экспозиция, масса и форма загружаемого материала, начальное влагосодержание, плотность) на качественные характеристики конечного материала и удельные затраты энергии. Установлено, что в режиме биостимуляции семян усиливается транслокация питательных веществ, что объясняется увеличением проводимости благодаря развитию больших градиентов давления в замкнутых микрообъемах растительной ткани на стадии нагрева при допустимом расширении клеточного объема. При обработке растительного материала с целью экстрагирования или температурного воздействия с целью изменения его питательных свойств, а также дезинфекции, разрушение клеточных стенок и локальное разрушение целлюлозных волокон приводит к интенсификации процессов переноса. Проведенные исследования кинетики сушки зерновых культур при микроволновом (непрерывном и пульсирующем), конвективном и микроволново-конвективном (циклическом, одновременном) подводе энергии и различных режимах (мощностях магнетронов, длительности подвода энергии и пауз, скоростях и температурах сушильного агента) привели к заключению, что оптимальным является одновременный МВ-конвективный способ подвода энергии, при котором достигаются максимальная скорость сушки, минимальные удельные затраты энергии и температура материала не превышает допустимую. Изменение безразмерного среднеинтегрального влагосодержания в процессах сушки при всех исследованных способах и режимах подвода энергии описываются единым обобщенным уравнением, что свидетельствует об идентичности закономерностей кинетики сушки. Для получения расчетных данных по температуре материала составлены новые и исследованы существующие математические модели теплопереноса при наличии внутренних источников теплоты, положительном, определяемом микроволновым полем, и отрицательным, связанным с испарением влаги. Обосновано применение уравнений параболического типа для описания явлений теплопроводности в условиях микроволнового нагрева, что в первую очередь связано с относительно низкой интенсивностью нагрева. На основании анализа и обобщения экспериментальных данных, результатов вычислительных экспериментов, проведенных по разработанным математическим моделям нагрева растительных материалов и сушки зерновых, сконструированы установки для микроволново-конвективной сушки зерна в плотном движущемся слое, микроволновой термообработке растительного субстрата и биостимуляции семян в микроволновом поле.

Ключевые слова: микроволновое поле, интенсификация, математическая модель теплопереноса, внутренние источники теплоты, удельная мощность, сушка, нагрев, экстрагирование, растительная ткань, микроволновые установки.

ABSTRACT

Boshkova, I.L. Intensification of heat and mass transfer processes in plant materials under effect of microwave electromagnetic field. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Science (Engineering) degree, specialty 05.14.06 – «Engineering Thermophysics and Industrial Heat-and-Power Engineering».– Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2015.

In the thesis the conditions have been determined on the basis of experimental and theoretical data on effects of microwave fields on plant materials of different kind (corn, stern, and other parts of a plant) at which within the framework of each of the investigated methods (biostimulation, thermal processing, extraction, drying) a maximum positive effect is expected in terms of intensification of the heat and mass transfer.

Statements on the peculiarities of heating in microwave fields have been formulated with respect to cell structure and plant transport system, experimental data have been generalized and models have been elaborated that take into account connections of transfer processes with structural changes of materials and physical parameters of the system.

Analysis of the influence of different factors (kind of plant material, power output of a microwave source, exposition, mass and form of loaded material, initial water content, and density) on the quality of end products and specific energy inputs has been carried out.

It has been determined that at the biostimulation of seeds regimes the translocation of feeding substances is strengthened as a consequence of improvement of transport properties.

Investigations of the drying kinetics carried out in the thesis have led to a conclusion that the simultaneous microwave-convection regime of energy input provides the optimum conditions.

Application of parabolic type differential equations for mathematical description of thermal conductivity at microwave heating conditions has been grounded. Recommendations for selection of regime parameters for microwave treatment of materials at which the transfer processes are intensified and the energy efficiency is increased have been obtained.

The results have been applied for development and design of industrial units for microwave-convection drying of corn in a dense moving bed, microwave thermal treatment of plant substrates and for microwave biostimulation of seeds.

Key words: microwave field, intensification, mathematical model of heat transfer, internal heat sources, specific power, heating, drying, extraction, plant tissue, microwave units.

