

Автореферат
130

g

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ДЕМЕНТЬЄВА ТАМАРА ЮРІВНА

Дем

УДК 664.723.047.3.086.2

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЛОГОПЕРЕНОСУ
ПРИ СУШІННІ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
МІКРОХВИЛЬОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Спеціальність

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2012

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській державній академії холоду

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент кафедри тепломасообміну
Одеської державної академії холоду МОНМС України
Бошкова Ірина Леонідівна

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор кафедри технічної
термодинаміки Одеської державної академії холоду МОНМС України
Дорошенко Олександр Вікторович

кандидат технічних наук, головний інженер державного підприємства
заводу «Генератор» Держконцерну Укроборонпрому
Дзюба Валентин Павлович

Захист дисертації відбудеться «24» 09 2012 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: 65082, м. Одеса, вул.
Дворянська, 1/3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою: 65082, м. Одеса, вул. Дворян-
ська, 1/3.

Ферат розісланий «22» 08 2012 р.

В.І. Мілованов

xv 1120
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

ГАЛУЗЕВИЙ
ВІДДІЛ

Актуальність теми. Енергетична криза і збільшення споживчого попиту на більш якісну продукцію, зокрема, зерна, стимулювали збільшення досліджень у пошуку ефективних технологій сушіння. Необхідність вдосконалення технології сушіння зерна обумовлена значним обсягом матеріалу, якому потрібне сушіння, великою питомою енергоемністю процесу та високими вимогами до збереження якості кінцевого продукту. В цьому напрямку перспективними є технології, засновані на застосуванні діелектричного нагрівання матеріалу від мікрохвильового (МХ) поля, що дає деякі переваги в операціях сушіння, зокрема, високу енергетичну ефективність і більш однорідний розподіл температури і вологи. Мікрохвильові технології відносяться до розряду енергозберігаючих в силу їх природної специфіки, проте для створення діючого обладнання необхідне проведення комплексних досліджень, метою яких є визначення раціональних умов процесу, при яких також буде досягатися рівномірність мікрохвильового поля, безаварійність і безпека роботи.

Дослідженню процесів сушіння з використанням мікрохвильового поля присвячується все більше наукових робіт. У нашій країні над вивченням процесів тепловологопереносу при мікрохвильовому нагріванні останнім часом працюють дослідницькі групи Календер'ян В.О., Станкевича Г.М., Бурдо О.Г., також відомі своїми публікаціями у цій галузі Потапов В.А., Погожих І.М., Малежик І.Ф., Поперечний А.М., Бичков Я.М., в Росії найбільш важливі результати отримані Гінзбургом А.С., Ликовим О.В., Пахомовим В.І., Рудобаштою С.П., міжнародні дослідники Leuca T., Molnar CO, Nelson SO, Tang J, Haghi AK, Prado MM, Mujumdar AS, Koziol A., Devahastin S. внесли великий вклад в математичне моделювання температурних полів і вологовмісту при обробці вологого діелектричного матеріалу в мікрохвильовому полі і в експериментальне дослідження. Слід зазначити, що при аналітичних дослідженнях більшість робіт, як наших, так і закордонних авторів, ґрунтуються на моделях О.В. Ликова. У той же час проведені з даної тематики дослідження не містять відповіді на ряд теоретичних та практичних питань, важливих для розробки технології сушіння щільного шару зернового матеріалу з використанням МХ поля і розробці обладнання для її реалізації, що визначило мету і завдання даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Постанови Верховної Ради України № 75/ 94-ВР від 1.07.94 р., що затвердила Закон України «Про енергозбереження», Постанови Кабінету Міністрів України № 148 від 5.02.97 р., що затвердила «Комплексну Державну Програму Енергозбереження».

Робота виконувалась в рамках держбюджетних тем кафедри тепломасообміну 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» (Додаток 51 до наказу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України № 1241) з 01.01.2012 по даний час. Ця робота є продовженням і розвитком досліджень тепломасопереносу в щільних дисперсних системах, що проводиться на кафедрі тепломасообміну (ТМО) ОДАХ.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка енергозберігаючого способу сушіння зерна в щільному шарі з використанням енергії мікрохвильового електромагнітного поля, що забезпечує інтенсифікацію процесу і зниження енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- 1) провести аналіз наукової і патентної літератури з теми дослідження;
- 2) скласти математичну модель, що описує температурне поле в щільному шарі вологого матеріалу при дії внутрішніх джерел теплоти і отримати її розв'язання для граничних умов третього роду;
- 3) експериментально дослідити кінетику сушіння щільного шару зернового матеріалу при різних способах підведення теплоти, вивчити вплив способу підведення теплоти, підведеної потужності, завантаження мікрохвильової камери, товщини шару, умов відведення пари, а також режимів мікрохвильово-конвективного сушіння на швидкість сушіння; вибрати оптимальний за питомими енерговитратами (з урахуванням вимог до якості зерна) спосіб та режим сушіння;
- 4) отримати формули для швидкості мікрохвильового сушіння, узагальнені залежності для температур та вологовмісту шару, справедливі в широкому діапазоні зміни режимних і геометричних параметрів, при різних способах підведення теплоти;
- 5) удосконалити методику теплового і конструктивного розрахунку установки для мікрохвильово-конвективного сушіння зернового матеріалу в рухомому щільному шарі;
- 6) провести варіантні розрахунки мікрохвильово-конвективної сушарки і визначити її раціональні режимні параметри;
- 7) розробити рекомендації до конструювання МХ-конвективної сушарки, яка реалізує обраний спосіб сушіння, з метою підвищення ККД установки, забезпечення її безаварійної та безпечної роботи.

Об'єктом дослідження є процес тепловологопереносу при сушінні щільного шару дисперсного матеріалу під дією електромагнітного поля мікрохвильової частоти.

Предметом дослідження є закономірності впливу способів та режимів сушіння на інтенсивність та енергоефективність процесу видалення вологи.

Методи досліджень: комплексні теоретичні та експериментальні дослідження процесів сушіння зернових культур у щільному шарі з використанням мікрохвильової енергії. Розподіл те-

мператур і вологовмісту в шарі визначалося розрахунковими методами, кінетика сушіння вивчалася експериментально. Рішення поставлених задач базуються на відомих теоретичних положеннях і експериментальних даних з кінетики сушіння, математичного моделювання, особливостей технології сушіння зерна.

Наукова новизна. У роботі вперше отримані нові наукові результати:

- розроблена математична модель теплопереносу в щільному шарі зернового матеріалу з урахуванням вологопереносу при дії внутрішніх джерел енергії (наприклад, мікрохвильове електромагнітне поле) для граничних умов третього роду (тепловіддача на поверхні);
 - експериментальним шляхом встановлено, що для сушіння щільного ($\epsilon \approx 0,4$) шару зернового матеріалу оптимальним способом є одночасне нагрівання в мікрохвильовому електромагнітному полі з продуванням повітрям без попереднього підігрівання зі швидкістю фільтрації $w = 0,9$ м/с; швидкість сушіння відповідала $N = 12,7 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с) і мінімальні питомі витрати енергії склали $q_{\text{по}} = 5,65$ МДж/кг, при цьому температура матеріалу не перевищує допустиму;
 - отримані узагальнені емпіричні залежності, що описують зміни безрозмірних температур і вологовмісту щільного шару для ряду зернових матеріалів (пшениця, овес, ячмінь, гречка) з похибкою 9,8 % і 11,9 %, відповідно;
 - одержані емпіричні формули для визначення швидкості сушіння в мікрохвильовому полі з урахуванням впливу продування ($w = 0,5 \dots 1,5$ м/с) та температури повітря ($t = 15 \dots 70$ °С), і питомих витрат енергії в діапазоні вологовмісту $u = 0,2 \dots 0,12$;
 - запропонована конструкція мікрохвильово-конвективної сушарки МКС, що дозволяє утилізувати теплоту повітря з системи охолодження магнетронів для попереднього підігрівання зерна, а спосіб підведення енергії відповідає визначеному оптимальному. Завдяки особливостям сушарки МКС, прогнозується зниження на 33...45 % питомих витрат енергії і збільшення в 7,8...7,6 разів питомого вологознімання у порівнянні з діючими промисловими конвективними сушарками.
- Практичне значення отриманих результатів:**
- аналітична залежність локальної температури зернового матеріалу від питомої потужності енергії мікрохвильового поля, питомої потужності енергії, що видається при випаровуванні вологи, фізичних і електрофізичних властивостей шару матеріалу дозволяє при проєктуванні сушарок оцінювати рівномірність нагрівання по товщині та вибрати доцільну для промислової установки;
 - застосування рекомендованого способу мікрохвильово-конвективного сушіння сприяє інтенсифікації процесів тепломасообміну і зниженню питомих витрат енергії;
 - отримані на підставі експериментальних даних для різних способів сушіння залежності швидкості сушіння від питомої потужності магнетронів, швидкості і температури повітря дозво-

ляють при проектуванні мікрохвильово-конвективних сушарок визначити питоме вологознімання, геометричні характеристики робочої камери, необхідну потужність магнетронів;

– рекомендації до конструювання сушарок, що використовують енергію мікрохвильового поля, дозволяють вирішувати питання підвищення ККД за рахунок утилізації теплоти від системи повітряного охолодження анодного блоку магнетронів, забезпечення ефективного видалення вологи з шару матеріалу.

Результати роботи були рекомендовані для впровадження при конструюванні мікрохвильово-конвективної установки безперервної дії для сушіння зерна у Південній філії відділення промрадіоелектроніки Міжнародної академії інформатизації (Одеса).

Особистий внесок здобувача полягає:

– в розробці математичної моделі, яка описує температурне поле у вологому матеріалі в процесі сушіння, та її розв'язанні при граничних умовах третього роду;

– у проведенні варіантних розрахунків по отриманій моделі для умов, аналогічних експериментальним, з метою оцінки її достовірності та визначення впливу різних параметрів на температурне поле матеріалу;

– у розробці методик експерименту та їх проведенні, в обробці та аналізі дослідних даних;

– в отриманні узагальнюючих емпіричних залежностей для швидкості сушіння, вологовмісту і температур при різних способах сушіння;

– проведенні варіантних розрахунків мікрохвильово-конвективної сушарки з рухомим щільним шаром і формулюванні рекомендацій до конструювання сушарок.

Апробація результатів дисертації. Головні результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідалися та обговорювалися на VII, VIII міжвузівській студентській науково-технічній конференції «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття» (м. Одеса, ОДАХ 2007, 2008), IX всеукраїнській науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття» (м. Одеса, ОДАХ 2009), Humboldt-Kolleg «Sciences, Engineering, and Humanities for the Energy World» (Odessa 2009), Humboldt-Kolleg «Philosophy of Science» (Odessa 2010), Міжнародному науково-технічному семінарі «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» (м. Воронеж 2010), 77-й науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішення проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, НУХТ 2011), Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 90-літтю з дня народження професора В.Ф. Чайковського «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (м. Одеса, ОНАХТ 2011), Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, ОНАХТ 2011), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, ХДУХТ 2011).

Публікації. Основні положення і результати роботи викладено у 9 статтях у фахових виданнях за переліком ВАК України, у тезах 10 доповідей на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях.

Обсяг і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та 5 додатків. Вона містить 137 сторінок основного тексту, 8 таблиць, 40 рисунків та список літератури з 157 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, викладені мета і завдання досліджень. Сформульовані наукова і робоча гіпотези дисертаційного дослідження, короткий зміст роботи, наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, а також основні наукові положення, що виносяться на захист. Наведено відомості про впровадження результатів досліджень, апробації, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі «Сучасний стан питань тепломасопереносу у мікрохвильових технологіях сушіння зернових матеріалів» проведена оцінка перспективності використання мікрохвильового електромагнітного поля для об'ємного нагрівання матеріалу, визначено специфіку роботи мікрохвильових пристроїв і особливості нагрівання матеріалу в електромагнітному полі мікрохвильової частоти. Відмічається, що актуальність дослідження мікрохвильової сушки зернових визначається тим, що мікрохвильові технології відносяться до розряду енергозберігаючих, проте для створення діючого обладнання необхідне проведення комплексних досліджень з метою визначення раціональних умов процесу, за яких будуть досягатися оптимальні енергетичні та якісні характеристики при дотриманні безаварійності і безпеки праці. Аналізуються особливості тепломасопереносу при сушінні щільного шару дисперсного матеріалу. Наголошується, що всі наведені в літературі відомості про коефіцієнти тепло- і масопереносу ґрунтуються на даних, отриманих експериментально. За результатами ряду дослідників проведена оцінка впливу мікрохвильового електромагнітного поля на якісні характеристики оброблюваного рослинного матеріалу. Визначено, що при сушінні в мікрохвильовому полі матеріалів рослинного походження з високим початковим вологовмістом структура стає гетерогенною, при мікрохвильово-конвективному сушінні структура більш гомогенна, і при сушінні матеріалів з початковим вологовмістом не вище 22 % структура матеріалу гомогенна. Результати опублікованих робіт свідчать, що якість матеріалів, висушених за допомогою мікрохвильової технології, часто розташовується між аеросушінням і сушінням виморожуванням. Аналізуються роботи, в яких наведені експериментальні результати дослідження кінетики сушіння щільного шару діелектричних матеріалів з використанням мікрохвильового нагрівання і моделювання процесів тепломасопереносу при сушінні дисперсних матеріалів. Зроблено

висновок, що при побудові аналітичної моделі як прототип доцільно використовувати модель, запропоновану О.В. Ликовим для опису температурних полів у напівобмеженому масиві з урахуванням дії внутрішніх джерел теплоти. Викладені передумови дозволили підтвердити робочу гіпотезу: збільшення швидкості сушіння, зниження нерівномірності висихання зерна по товщині шару, зниження питомих енерговитрат можливо за рахунок застосування технології, що використовує вплив мікрохвильового електромагнітного поля.

Проаналізовано наявні в даний час установки для сушіння дисперсних матеріалів із застосуванням мікрохвильового поля. Розглянуто питання безпеки мікрохвильових установок.

У другому розділі «Аналітичне дослідження температурного поля в тілі з безперервно діючими джерелами теплоти» наводиться математична модель у диференціальному вигляді, що описує температурне поле у напівобмеженому масиві при дії двох внутрішніх джерел теплоти: позитивного, обумовленого взаємодією МХ поля з вологим матеріалом, і негативного, що визначається випаровуванням вологи. Модель являє собою диференціальне рівняння теплопроводності (1) з відповідними умовами однозначності: початкові умови (2), граничні умови (3).

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{n}{c \cdot \rho} + \frac{q_v}{c \cdot \rho}; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_{\text{нов}}) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}, \quad (4)$$

де t – температура; x – поточна координата; τ – час; a , λ , c , ρ – відповідно коефіцієнти теплопроводності і теплопровідності, питома теплоємність та щільність шару матеріалу; α – коефіцієнт тепловіддачі, n – позитивне джерело теплоти, q_v – негативне джерело теплоти.

Прийнято, що джерела теплоти є експоненціальною функцією координати: $n = n_0 \cdot e^{-\gamma x}$ та $q_v = q_{v0} \cdot e^{-\beta x}$. Тут n_0 – максимальна питома потужність позитивного джерела, Вт/м³, γ – коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії в шарі, м⁻¹; q_{v0} – максимальна питома потужність негативного джерела, Вт/м³; β – коефіцієнт ослаблення інтенсивності випаровування в шарі, м⁻¹. Експоненціальний закон зміни внутрішніх джерел, що характеризують витрати енергії на нагрівання і випаровування вологи, прийняті на підставі рекомендацій О.В.Ликова.

Застосовуючи перетворення Лапласа, було отримано розв'язання описаного вище диференціального рівняння в явному вигляді:

$$t(x, \tau) = \left[\frac{t_0 - t_{\text{нов}}}{\lambda} + A_1 \cdot \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} + A_2 \cdot \frac{1}{\beta + \frac{\alpha}{\lambda}} \right] \cdot \left(-\frac{\lambda}{\gamma} \cdot \text{Erf}(P) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma \sqrt{a} \left(-\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erf} \left(P - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \right) + A_1 \cdot (\alpha - \alpha \cdot \gamma) \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot (-\text{Erf}(P) + e^{-\gamma \sqrt{a} \left(-\gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erf}(P - \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau})) + \frac{1}{\gamma \cdot \left(\gamma + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot (\text{Erf}(P) + e^{-\gamma \sqrt{a} \left(\gamma \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erf}(P + \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau})) \right] + A_2 \cdot (\gamma - \beta \cdot \lambda) \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta^2 \cdot \lambda} \cdot \left(-\text{Erf}(P) + e^{-\beta \sqrt{a} \left(-\beta \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erf}(P - \beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau}) \right) \cdot \frac{1}{\beta - \frac{\alpha}{\lambda}} + \frac{1}{\beta \cdot \left(\beta + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot \left(\text{Erf}(P) - e^{-\beta \sqrt{a} \left(\beta \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \text{Erf}(P + \beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau}) \right) + \frac{A_1}{\gamma^2} \cdot (e^{\alpha \gamma^2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\gamma x} + \frac{A_2}{\beta^2} \cdot (e^{\gamma \beta^2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\beta x} + t_0, \quad (5)$$

$$\text{де } P = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}, \quad A_1 = \frac{n_0}{c \cdot \rho \cdot a}, \quad A_2 = \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a}.$$

Отримана залежність дозволяє розрахувати температурне поле для трьох періодів сушіння: нульовому (період прогрівання), першому (період сталої швидкості сушіння) і другому (період падаючої швидкості сушіння). Відмінності в періодах задаються відповідними значеннями величин, що входять у вихідні дані. Так, для нульового періоду приймається, що вода практично не випаровується, тобто негативне джерело теплоти дорівнює нулю. У першому періоді слід задатися швидкістю сушіння N , яка визначає значення негативного джерела: $q_{v0} = -\rho \cdot N \cdot r$ (де r – питома теплота пароутворення). Швидкість сушіння при проведенні розрахунків визначається даними експериментів.

Виконано розрахунки при різних значеннях коефіцієнтів тепловіддачі, питомої потужності магнетронів (позитивне джерело), коефіцієнта теплопроводності матеріалу. Вихідні дані для розрахунку відповідають умовам окремих експериментів: матеріал – овес з початковим вологовмістом $u = 0,2$ кг/кг і масою $m = 0,1$ кг, вихідна потужність магнетрона – від 100 до 600 Вт. Теплофізичні властивості шару розраховувалися як ефективні величини з урахуванням його шпаруватості $\epsilon = 0,4$. Розрахункові дані свідчать про відповідність отриманої моделі реальним фізичним процесам, що проходять при сушінні цільного шару матеріалу в умовах дії внутрішніх джерел теплоти: збільшення коефіцієнта тепловіддачі призводить до зниження температури поверхні (рис. 1); при фіксованому коефіцієнті тепловіддачі і на незначній відстані від поверхні температура вище, ніж на поверхні. Потім, у зв'язку зі значним поглинанням енергії шаром, температура починає падати. Розрахункові та експериментальні дані по температурі поверхні матеріалу задовільно корелюються (рис. 2). При розрахунках швидкість сушіння вибиралася відповідно зі значеннями, отриманими в експерименті.

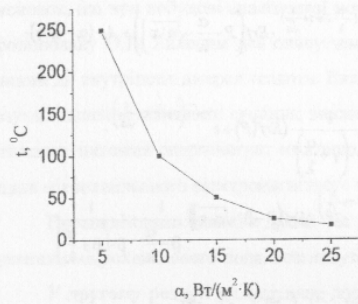


Рис. 1. Залежність температури поверхні матеріалу від коефіцієнта тепловіддачі

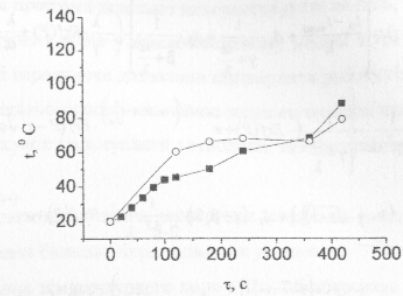


Рис. 2. Температура поверхні матеріалу: \circ – експериментальні дані; \blacksquare – дані розрахунку. Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, потужність магнетрону $N = 180 \text{ Вт}$

Розрахунки показують, що із збільшенням питомої потужності позитивного джерела температура поверхні зростає (рис. 3). Розподіл температури матеріалу по товщині шару при різних значеннях коефіцієнта ослаблення електромагнітної енергії наведено на рис. 4.

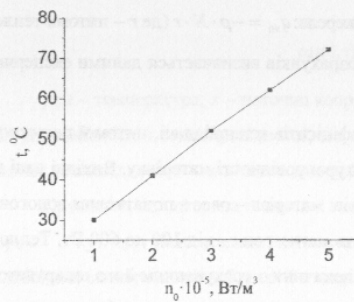


Рис. 3. Вплив питомої потужності магнетрону на температуру матеріалу

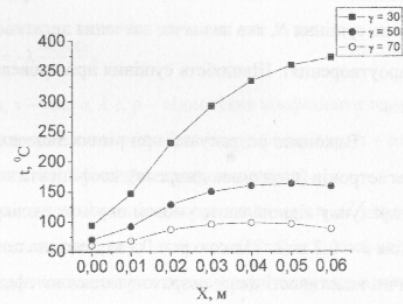


Рис. 4. Розподіл температури по товщині шару матеріалу при різних значеннях γ . Тривалість сушіння $\tau = 120 \text{ с}$.

Досліджено характер зміни температури в умовах дії негативного джерела теплоти. Зі збільшенням його значення температура матеріалу падає (рис. 5), що пов'язано з втратою енергії за рахунок випаровування.

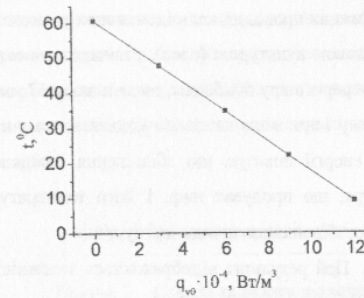


Рис. 5. Залежність температури матеріалу від питомої потужності негативного джерела теплоти при $x=0 \text{ м}$, $\tau=120 \text{ с}$, $\beta=1,025 \text{ м}^{-1}$

Аналіз впливу коефіцієнта γ на температурне поле всередині тіла (рис. 4) свідчить, що дійсні результати з розподілу температури по глибині матеріалу (при врахуванні його теплофізичних характеристик) дають значення $\gamma = 70 \text{ м}^{-1}$. З ростом γ зменшується глибина проникнення, що призводить до швидкого загасання електромагнітної енергії. У цьому випадку велика частина мікрохвильової енергії поглинається поверхневими шарами і температура їх буде вище, ніж при меншому значенні γ . Це відображається результатами розрахунку. Так, при $\gamma = 1 \text{ м}^{-1}$ температура на поверхні через 20 с складає $t = 36,1 \text{ °C}$, на глибині $x = 0,01 \text{ м}$ температура $t = 56,0 \text{ °C}$. За тих же умов (овес масою 100 г, початкова температура 20 °C , $\tau = 20 \text{ с}$), але при $\gamma = 70 \text{ м}^{-1}$ на поверхні матеріалу встановиться температура $t = 33,0 \text{ °C}$, а на глибині $x = 0,01 \text{ м}$ – $t = 64,3 \text{ °C}$.

Аналіз отриманих результатів привів до висновку, що розрахункова залежність дозволяє отримувати дані про температуру нагрівання дисперсного матеріалу (зернові культури) в процесі їх сушіння в мікрохвильовому електромагнітному полі. Розрахункові дані задовільно корелюють з експериментальними і свідчать про їх відповідність фізичній картині процесу теплового перенесення при сушінні.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження сушіння зернових культур при різних способах підведення енергії» наведені результати експериментів, метою яких було визначення, який спосіб підведення енергії (мікрохвильовий, мікрохвильово-конвективний, конвективний) і які режимні параметри забезпечують високу інтенсивність процесу сушіння і необхідну якість готового продукту при мінімальних енерговитратах. Для вирішення цих завдань для кожного способу проводили експерименти при різних режимах: безперервному мікрохвильовому, мікрохвильовому пульсуючому з різною тривалістю пауз, одночасному мікрохвильово-конвективному і циклічному мікрохвильово-конвективному, а також конвективному, для можливості зіставлення даних з найбільш поширеним методом сушіння. При обробці дослідних даних визначали закономірності зміни середньоінтегрального вологовмісту і температур, швидкість сушіння, витрати енергії на 1 кг випарованої вологи. Схема експериментальної установки наведена на рис. 6.

Для кожного з режимів були проведені серії експериментів з метою визначення впливу заданих параметрів процесу, таких як вихідна потужність магнетрону, тривалість підведення МХ енергії, тривалість і кількість пауз (для пульсуючих режимів), температура повітря, тривалість

продувки (для циклічних режимів), температура і витрати повітря (для конвективного сушіння). Для забезпечення ефективності зіставлення всі дослідження проводились в ідентичних умовах: на одній і тій же установці (рис. 6), з однієї і тією ж зерною культурою (овес), з початковим вологовмістом 0,2 кг/кг, із зразками однакових розмірів (переріз шару 50х50 мм, висота шару 57 мм) і масою 100 г. Порівняння сушіння при мікрохвильовому і при мікрохвильово-конвективному під-

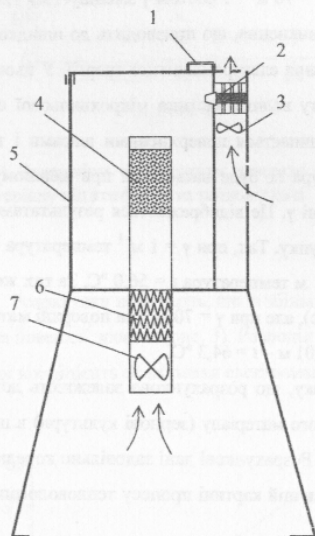


Рис. 6. Схема установки для дослідження кінетики сушіння зернових матеріалів при мікрохвильовому та конвективному нагріванні:

1 – дверці; 2 – магнетрон; 3 – вентилятор системи охолодження магнетрону; 4 – експериментальний осередок з матеріалом для досліджень; 5 – робоча камера; 6 – електронагрівач; 7 – вентилятор

$$N_{\text{МХ}} = 1,57 \cdot 10^{-7} (q_m)^{1,17}, \text{ кг(кг}\cdot\text{с)} \quad (7)$$

Для розрахунку середньої температури зерна в періоді сталої швидкості сушіння (першому періоді) за результатами обробки експериментальних даних отримана наступна формула, похибка якої складає 13 %:

$$t_1 = 13,22 \cdot (q_m)^{0,28}, \text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

воді енергії показує, що збільшення швидкості повітря, що продуває шар, і його температури сприяє збільшенню швидкості сушіння.

Цей результат відображається залежністю (6), яка узагальнює відповідні дані:

$$\frac{N_{\text{МХ-К}}}{N_{\text{МХ}}} = 1 + 0,0003937 \text{ Re}^{0,799} \left(\frac{t_n}{t_{\text{н.с}}} \right)^{1,037}, \quad (6)$$

де $N_{\text{МХ-К}}$ – швидкість сушіння при мікрохвильово-конвективному підведенні енергії, $N_{\text{МХ}}$ – при мікрохвильовому підведенні, t_n – температура повітря, що продуває шар матеріалу, $t_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища.

Формула справедлива з похибкою 5,7 % при числах Рейнольдса до $\text{Re} = 4500$ і температурах повітря, що продуває шар зерна, в межах $t_n = 19 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дослідження, проведені на інших зернових матеріалах (пшениця, ячмінь, гречка) показали, що дані по швидкості сушіння у першому періоді для всіх матеріалів можуть бути узагальнені єдиною залежністю (7), максимальна похибка якої складає 15 %:

За результатами розрахунків і з урахуванням температури шару, для кожного режиму визначали оптимальні параметри (швидкість сушіння, питомі затрати енергії) та відповідні робочі параметри процесу (вихідна потужність магнетрону, співвідношення між мікрохвильовою дією і продуванням повітрям, температура та швидкість повітря). У табл. 1 наведені дані по сушінню за режимами, які забезпечують раціональні характеристики процесу для кожного досліджуваного способу.

Таблиця 1

Характеристики процесів сушіння при різних способах підведення енергії

Режим	Спосіб та режим підведення енергії	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Питомі затрати енергії, МДж/кг
I	МХ безперервний $\tau_{\Sigma} = 30 \text{ с}$, $P_c = 600 \text{ Вт}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	15,79
II	МХ-пульсуючий $\tau_{\Sigma} = 120 \text{ с}$, $\tau_{\text{МХ}} = \tau_n = 20$, $n = 3$ $P_c = 600 \text{ Вт}$.	$4,4 \cdot 10^{-4}$	8,13
III	МХ-конвективний, циклічний $\tau_{\Sigma} = 130 \text{ с}$, $\tau_{\text{МХ}} = \tau_{\text{к}} = 10 \text{ с}$, $\tau_{\Sigma\text{к}} = 60 \text{ с}$, $\tau_{\Sigma\text{МХ}} = 70 \text{ с}$, $w_{\text{п}} = 1 \text{ м/с}$, $P_c = 600 \text{ Вт}$, $n = 6,5$, $t_{\text{п}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.	$4,3 \cdot 10^{-4}$	9,07
IV	МХ-конвективний, одночасний $\tau_{\Sigma} = 60 \text{ с}$, $P_c = 600 \text{ Вт}$, $t_{\text{п}} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $w_{\text{п}} = 0,9 \text{ м/с}$	$12,7 \cdot 10^{-4}$	5,65
V	Конвективний $\tau_{\Sigma} = 180 \text{ с}$, $w_{\text{п}} = 1,5 \text{ м/с}$, $t_{\text{п}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	34,82

Аналіз таблиці дозволив зробити висновок, що оптимальним є одночасний МХ-конвективний спосіб підведення енергії, при якому досягаються мінімальні питомі витрати енергії і максимальна швидкість сушіння.

У четвертому розділі «Проектування установки для сушіння щільного шару дисперсних матеріалів при різних способах підведення теплоти» наведені результати розрахунків мікрохвильово-конвективних сушарок для щільного рухомого шару зерна.

Метою розрахунків був вибір схеми сушарки, що може бути рекомендована до виконання, її габаритні розміри, характеристики охолоджувача висушеного матеріалу і теплообмінника для попереднього підігріву вологого матеріалу, а також необхідну потужність установки. Основні елементи схеми та методика розрахунку установки ґрунтувалися на залежностях, отриманих при

обробці експериментальних даних, і результатах конструювання пілотної установки для сушіння щільного шару.

Схема установки представлена на рис. 7. Установка містить завантажувальний бункер 1, камеру попереднього підігріву зерна 2, технологічне вікно 3, перфорований насадок 4, повітровід від системи охолодження магнетронів до насадки 5, камеру сушіння 6, канал для сипкого матеріалу 7, випускний пристрій 8, охолоджувач зерна 9, магнетрон 10, повітровід від системи охолодження магнетронів до камери попереднього підігріву 11.

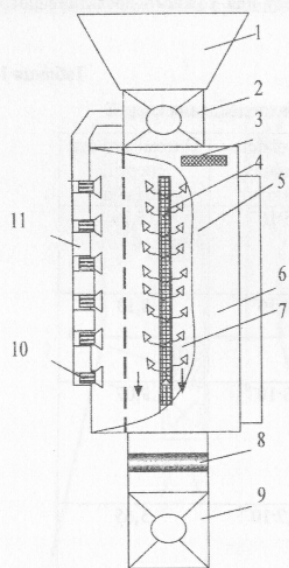


Рис. 7 - Установка для сушіння зернових матеріалів при мікрохвильово-конвективному підведенні енергії

Теплові конструкторські розрахунки були проведені для двох способів підігріву зерна в бункері засипки: у першому – за рахунок теплоти повітря від охолоджувача зерна, у другому – за рахунок теплоти повітря від системи повітряного охолодження (СПО) анодного блоку магнетронів. Аналіз результатів показав, що друга схема є кращою. У табл. 2 наведено основні характеристики мікрохвильово-конвективної сушарки (МКС), що є предметом даної роботи, стаціонарних зерносушарок від компанії RIELLA (Німеччина), MC-975 (Росія), СЗК-15ж (Білорусія) та RCW-junior 100 (Фінляндія).

Теплові конструкторські розрахунки були проведені для двох способів підігріву зерна в бункері засипки: у першому – за рахунок теплоти повітря від охолоджувача зерна, у другому – за рахунок теплоти повітря від системи повітряного охолодження (СПО) анодного блоку магнетронів. Аналіз результатів показав, що друга схема є кращою. У табл. 2 наведено основні характеристики мікрохвильово-конвективної сушарки (МКС), що є предметом даної роботи, стаціонарних зерносушарок від компанії RIELLA (Німеччина), MC-975 (Росія), СЗК-15ж (Білорусія) та RCW-junior 100 (Фінляндія).

Таблиця 2

Порівняльні характеристики мікрохвильово-конвективної сушарки (МКС) і конвективних промислових сушарок

Тип сушарки	Технічні характеристики					
	$P_{\text{спож}} \text{ кВт}$	$u_0 - u_k \%$	Об'єм сушарки, м^3	Продуктивність по вологому зерну, т/год	Питоме вологознімання, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	Питомі витрати теплоти кДж/кг вол.
МКС	57,87	20-14	0,24	1,08	0,0635	3858
RIELLA Alu 240/5/1	419,25	19-15	7,5	6,5	0,0081	6929
MC-975	1163	17-12	25,1	17,5	0,0083	5600
СЗК-15ж	1200	20-14	25	15	0,0083	5755
RCW-junior 100	254	19-14	10,17	2,5	0,0003	8761

Порівняння розрахованої сушарки МКС з живими в промисловості конвективними сушарками показало, що питоме вологознімання збільшується в 7,8 разів (RIELLA) і в 7,6 разів (СЗК-15Ж); питомі витрати енергії знижуються на 33 % (СЗК-15Ж) та на 45 % (RIELLA).

ВИСНОВКИ

1. На основі аналітичних та експериментальних досліджень фізичних закономірностей тепловологопереносу в щільному шарі зернового матеріалу розроблена математична модель, яка описує температурне поле матеріалу при його нагріванні у мікрохвильовому електромагнітному полі (дія позитивного джерела теплоти) в умовах випаровування вологи з матеріалу (дія негативного джерела теплоти) для граничних умов третього роду.

2. Запропонована аналітична залежність для розрахунку температурного поля з урахуванням дії двох джерел теплоти, позитивного і негативного, яка дозволяє отримувати дані про температуру нагрівання дисперсного матеріалу (зернові культури) в процесі його сушіння в мікрохвильовому електромагнітному полі. Результати розрахунків задовільно корелюють з експериментальними даними.

3. Отримані емпіричні формули для розрахунку температури шару матеріалу та відносного вмісту вологи, які дозволяють проводити аналіз процесів перенесення теплоти і вологи та інтенсифікувати процес сушіння.

4. Встановлено, що метод конвективного сушіння у порівнянні з методами, які використовують нагрівання в мікрохвильовому полі, є найбільш енерговитратним. Питомі витрати енергії в раціональному режимі при мікрохвильовому пульсуючому сушінні у 4,3 рази нижче, ніж при конвективному сушінні, при циклічному (осилюючому) мікрохвильово-конвективному – у 3,9 разів нижче конвективного, при одночасному мікрохвильово-конвективному – у 6,2 рази нижче, ніж при конвективному сушінні.

5. Встановлено, що оптимальним є одночасний мікрохвильово-конвективний спосіб сушіння при таких раціональних режимних параметрах: підведена питома потужність не більше 600 Вт/кг вологого матеріалу, швидкість фільтрації зовнішнього повітря 0,9 м/с при температурі 18...20 °С. При цьому температура матеріалу не перевищує допустиму, досягаються мінімальні питомі витрати енергії на випаровування вологи $q_{\text{вип}}=5,65 \text{ МДж/кг}$ та максимальна швидкість сушіння $N=12,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$.

6. Запропонована емпірична формула для розрахунку швидкості мікрохвильово-конвективного сушіння в залежності від швидкості і температури повітря з максимальною похибкою 15 %.

7. Встановлені узагальноючі кінетичні закономірності зміни вологовмісту і температури ячменю, вівса, гречки і пшениці при масі матеріалу 0,1...0,4 кг, його початковому вологовмісті 0,22...0,20 кг/кг та потужності магнетрону 100...600 Вт.

8. Виявлено, що утилізація теплоти повітря з системи повітряного охолодження анодних блоків магнетронів мікрохвильової-конвективної сушарки зменшує на 27 % споживану енергію у порівнянні зі схемою, яка передбачає утилізацію теплоти від охолоджувача висушеного матеріалу (при масових витратах зерна $G = 0,3$ кг/с по вологому матеріалу з початковим вологовмістом $w_0 = 0,2$ кг/кг).

9. Встановлено, що запропонована мікрохвильово-конвективна сушарка здатна на 33...45 % знизити питомі витрати енергії і в 7,8...7,6 разів збільшити питоме вологознімання у порівнянні з діючими промисловими конвективними сушарками.

10. На основі результатів виконаних досліджень за удосконаленою методикою визначено енергетичні та конструктивні параметри мікрохвильово-конвективної сушарки для фермерських господарств, які спеціалізуються на виробництві зерна — продуктивність сушарки становить 1,08 т/год по вологому матеріалу при зниженні його вологовмісту з 20 % до 14 %, споживана потужність складає 57,9 кВт.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вердиева*, Т.Ю. Результаты исследования кинетики сушки зерновых материалов в условиях действия микроволнового нагрева [Текст] / Т.Ю. Вердиева, Е.А. Островская // Эколого-энергетичні проблеми початку XXI століття. VII міжвузівська студентська науково-технічна конференція. Збірник наукових праць. – Одеса: ОДАХ, 2007. – С. 34.

Особистий внесок: складання методики досліджень, участь у дослідженнях, аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до друку та виступу на конференції.

2. Календерьян, В.А. Экспериментальное исследование микроволновой сушки зерна [Текст] / В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Вердиева // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2008. – Вип. 34. – Т. 1. – С. 106-109.

Особистий внесок: аналітичний огляд літературних джерел, складання методики досліджень, аналіз експериментальних даних, вивід узагальноючих залежностей вологовмісту і температури від часу сушки, підготовка матеріалів до друку.

3. Календерьян, В.А. Сушка зерновых культур в плотном слое с применением микроволнового поля [Текст] / В.А.Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Т.Ю. Вердиева, Е.М. Островская // Хранение и переработка зерна. – Одесса: ОНАПТ, 2008. – № 1(103). – С. 16-17.

Особистий внесок: аналіз експериментальних даних по кінетиці сушки різних видів зернового матеріалу (вівса, гречки, пшениці, ячменю) при мікрохвильовому підведенні теплоти. Отримання емпіричної формули для розрахунку швидкості сушки в першому періоді, підготовка матеріалів до друку.

4. Вердиева, Т. Ю. Перспективы использования микроволнового нагрева для сушки зерна [Текст] // Эколого-энергетичні проблеми початку XXI століття. VIII міжвузівська студентська науково-технічна конференція. Збірник наукових праць. – Одеса: ОДАХ, 2008. – С. 84-85.

5. Вердиева, Т. Ю. Особенности кинетики микроволновой сушки зерновых [Текст] / Т. Ю. Вердиева, А. С. Тупало // Эколого-энергетичні проблеми початку XXI століття. VIII міжвузівська студентська науково-технічна конференція. Збірник наукових праць. – Одеса: ОДАХ, 2008. – С. 85.

Особистий внесок: складання методики досліджень, аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до друку та виступу на конференції

6. Вердиева, Т. Ю. Сушка кукурузы с применением микроволнового поля [Текст] / Т. Ю. Вердиева, А. С. Маркварт // Humboldt-Kolleg Sciences of Engineering, and Humanities for the Energy World. Book of abstracts. – Odessa: Odessa State Academy of Refrigeration, 2009. – P. 63-65.

Особистий внесок: складання методики досліджень та проведення експериментальних досліджень, аналіз експериментальних даних, отримані, підготовка тез до друку та виступу на конференції.

7. Вердиева, Т.Ю. Застосування мікрохвильового нагріву для сушки зерна [Текст] // Эколого-энергетичні проблеми початку XXI століття. IX всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і аспірантів. Збірник наукових праць. – Одеса: ОДАХ, 2009. – С.16-17.

8. Калинин, Л. Г. Биостимуляция семян в микроволновом электромагнитном поле [Текст] / Л. Г. Калинин, И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева // Humboldt-Kolleg Philosophy of Science. Book of abstracts.– Odessa: Odessa State Academy of Refrigeration, 2010. – P. 75-77.

Особистий внесок: участь в проведенні експериментальних досліджень, та виступу на конференції

9. Волгушева, Н. В. Расчет охладителя для микроволново-конвективной сушилки зерновых материалов [Текст] / Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева // Холодильна техніка та технологія. – Одеса: ОДАХ, 2010. – № 6 (128). – С. 4-7.

Особистий внесок: аналітичний огляд літературних джерел, розрахунок охолоджувача, підготовка матеріалів до друку

10. Дементьева, Т. Ю. Анализ энергетической эффективности микроволновой, конвективной и комбинированной сушки зерна [Текст] // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2010. – Вип. 38. – Т.1. – С. 139-142

11. Станкевич, Г. Н. Исследование кинетики конвективно-микроволновой сушки зерновых культур в неподвижном слое [Текст] / Г. Н. Станкевич, Л. К. Овсянникова, Е. Г. Соколовская, Т. Ю. Дементьева // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. Международный научно-технический семинар. Материалы семинара. – Воронеж – 2010. – С. 286-295.

Особистий внесок: складання методики досліджень та проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих даних, підготовка матеріалів до друку.

12. Календерьян, В. А. 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 // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2011. – Вип. 39. – Т.2. – С. 211-215.

Особистий внесок: аналіз експериментальних даних по кінетиці сушіння при різних режимах підведення енергії. Вивід узагальнюючої залежності для розрахунку швидкості мікрохвильово-конвективного сушіння, підготовка матеріалів до друку.

13. Календерьян, В. А. Влияние режимных параметров на характеристики установки для микроволново-конвективной сушки зерновых культур в движущемся слое [Текст] / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2011. – Вип. 40. – Т.1. – С. 86-91.

Особистий внесок: розрахунки сушильної установки, аналіз впливу варіюваних параметрів на габарити установки, підготовка матеріалів до друку.

14. Бошкова, И. Л. Анализ вариантних розрахунків МХ-конвективної сушарки [Текст] / И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева, И. О. Кузнецов, А. О. Поберезкин // Холодильная техника та технологія. – Одеса: ОДАХ, 2011. - №6 (134). – С. 42-45.

Особистий внесок: обґрунтування доцільності використання теплоти повітря від охолоджувача зерна та від системи повітряного охолодження анодного блоку магнетронів для попереднього підігріву зерна, підготовка матеріалів до друку.

15. Бошкова, И. Л. Расчет охладителя для сушки зерновых материалов [Текст] / Бошкова И. Л., Волгушева Н. В., Т. Ю. Дементьева // Современные проблемы холодильной техники и технологии. – Одесса: ОНАИПТ, 2011. – С. 132-133.

Особистий внесок: аналіз конструкторських розрахунків установки, проведення розрахунків рекуперативного теплообмінника для попереднього підігріву матеріалу та контактного, підготовка матеріалів до друку, участь у конференції.

16. Дементьева, Т. Ю. Оценка энергетической эффективности конвективной, микроволновой и микроволново-конвективной сушки зерна [Текст] // Наукові здобуття молоді – вирішення проблем харчування людства у XXI столітті. – 77-а наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів. – Київ: НУХТ, 2011. – С. 119.

17. Дементьева, Т. Ю. Аналитическое представление процесса микроволновой сушки зерна [Текст] // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини. Всеукраїнська науково-практична конференція. Збірник наукових праць – Харків: ХДУХТ, 2011. – С. 17-18.

18. Календерьян, В. А. Пилотная установка для микроволново-конвективной сушки движущегося плотного слоя зерна [Текст] / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, Т. Ю. Дементьева // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини. Всеукраїнська науково-практична конференція. Збірник наукових праць. – Харків: ХДУХТ. – С. 17-18.

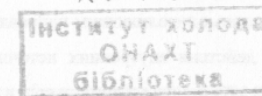
Особистий внесок: участь в розробці основних елементів установки, підготовка матеріалів до друку та виступу на конференції

19. Бошкова, И. Л. Аналитическое исследование температурного поля в теле с непрерывно действующими источниками теплоты [Текст] / И. Л. Бошкова, Т. Ю. Дементьева // Современные проблемы холодильной техники и технологии. – Одесса: ОДАХ, 2012. – С. 42-45.

Особистий внесок: аналітичний огляд літературних джерел, складання та вирішення математичної моделі теплопереносу при сушінні в умовах дії внутрішніх джерел теплоти. Порівняння розрахункових і експериментальних даних по температурах матеріалу, підготовка матеріалів до друку.

*Вердєва Т. Ю. – дівоче прізвище Дементьевої Т. Ю.

xv 1120



АНОТАЦІЯ

Дементьева Т. Ю. Интенсификация процессов теплового переносу при сушінні зернового матеріалу з застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2012.

Дисертація присвячена розробці енергоощадної технології сушіння зерна в щільному шарі з використанням енергії мікрохвильового електромагнітного поля. Технології, що використовують нагрівання в мікрохвильовому полі, відносяться до розряду енергоощадних, проте для створення діючого устаткування необхідне проведення комплексних досліджень, завданнями яких є визначення раціональних умов процесу. Отримана аналітична залежність для розрахунку температурного поля щільного шару при сушінні у мікрохвильовому полі. Експериментально вивчений вплив різних чинників на швидкість сушіння і питомі витрати енергії. Встановлено, що для досліджуваних видів зернових (пшениця, овес, ячмінь, гречка) дані за швидкістю сушіння і температури в

першому періоді можуть бути узагальнені єдиними залежностями. Проведені в дисертаційній роботі експериментальні дослідження є першим комплексним дослідженням стосовно вивчення кінетики сушіння при різних можливих способах підведення енергії і в різних режимах, що дозволило на підставі порівняльного аналізу визначити раціональний за енергетичними витратами метод проведення сушіння.

Ключові слова: сушіння, мікрохвильова енергія, внутрішнє джерело енергії, зернові матеріали, температурне поле, швидкість сушки, питомі витрати.

АННОТАЦИЯ

Дементьева Т.Ю. Интенсификация процессов тепло-влажнопереноса при сушке зернового материала с применением микроволнового электромагнитного поля. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская государственная академия холода, Одесса, 2012.

Диссертация посвящена разработке энергосберегающего метода сушки зерна в плотном слое с использованием энергии микроволнового электромагнитного поля. Технологии, использующие нагрев в микроволновом поле, относятся к разряду энергосберегающих, однако для создания действующего оборудования необходимо проведение комплексных исследований, задачами которых является определение рациональных условий процесса. Исследования проводились по двум взаимодополняющим направлениям: теоретическое изучение явлений массопереноса в условиях действия внутренних источников теплоты, и экспериментальное исследование кинетики сушки при использовании энергии микроволнового поля в различных сочетаниях с конвективной сушкой. В работе получена аналитическая зависимость для расчета температурного поля плотного слоя дисперсного материала при сушке в микроволновом поле с учетом граничных условий третьего рода (теплоотдача с поверхности), которая позволяет расчетным путем оценить влияние коэффициента теплоотдачи, мощности положительного (определяемого действием микроволнового поля) и отрицательного (определяемого испарением) источников, теплофизических и диэлектрических свойств материала, экспозиции, на значения локальных температур массива. Данная аналитическая зависимость применима для расчета процесса сушки, начиная с периода прогрева. Проведенные расчеты позволили обосновать толщину слоя материала для промышленных сушилок. Сопоставление с моделями, которые разрабатывались для решения подобных задач, и отличающихся заданием граничных условий (первый род), а также учитывающие период сушки, показало, что полученная в работе модель включает их как частные случаи, в которые переходят решения при больших коэффициентах теплоотдачи. Экспериментально изучено влияние различных факторов на скорость сушки и удельные затраты энергии при микроволновом, пульсирующем

микроволновом, циклическом микроволново-конвективном способе сушки (при различной температуре воздуха) и непрерывном микроволново-конвективном способе. Анализ результатов по таким показателям, как скорость сушки, удельные затраты энергии, температура материала позволил обосновать, какой способ и в каком режиме является оптимальный и может быть рекомендован. Данные, используемые для сравнения, полученных на единой установке с одним материалом (овес) при начальном влагосодержании 20 %. Установлено, что для исследуемых видов зерновых (пшеница, овес, ячмень, гречиха) данные по скорости сушки и температуре в первом периоде могут быть обобщены едиными зависимостями. Проведенные в диссертационной работе экспериментальные исследования являются первым комплексным исследованием применительно к изучению кинетики сушки при различных возможных способах подвода энергии и в различных режимах, что позволило на основании сопоставительного анализа определить оптимальный по энергетическим затратам метод ведения сушки. Полученные эмпирические зависимости для скорости сушки, а также ряд рекомендаций технологического характера, были использованы при проектировании микроволново-конвективной сушилки для плотного движущегося слоя зернового материала. Выполненные вариантные расчеты сушилки с учетом двух различных схем утилизации теплоты позволили выбрать схемное решение, геометрические характеристики установки и рабочие параметры.

Ключевые слова: сушка, микроволновая энергия, внутренний источник энергии, зерновые материалы, температурное поле, скорость сушки, удельные затраты.

SUMMARY

Dementyeva T. Yu. Intensification of heat and moisture transfer processes in the course of grain material drying using a microwave electromagnetic field. The manuscript.

The thesis for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in speciality 05.14.06 – Technical thermal physics and industrial heat-power engineering. – The Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2012.

The thesis is dedicated to the development of an energy saving technology of grain drying in a dense bed using the energy of a microwave electromagnetic field. The technologies using heating in a microwave field, reckon among the category of energy saving ones. However, for the creation of operating equipment it is necessary to carry out a complex research for determination of rational conditions for the process. The analytical dependence for a temperature field calculation of a dense bed in the course of drying in a microwave field has been obtained. The influence of different factors on speed of drying and specific energy consumption has been experimentally studied. It was found that for the investigated species of grain crops (wheat, oats, barley and buckwheat) the data on speed of drying and temperature in the first period can be generalized by uniform dependences. The experimental research

carried out in the thesis is the first complex study of kinetics of drying in different possible ways of power supply line and different modes that enabled us to determine rational, based on energy expenditure, a drying method on the ground of the comparative analysis.

Keywords: drying, microwave energy, an internal energy source, grain materials, a temperature field, speed of drying, specific expenses.