

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



**ВОСКРЕСЕНСЬКА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА**

**УДК 664.723-045.5**

**КОМБІНОВАНІ СПОСОБИ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ ПРОДУКТІВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

## Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник** - кандидат технічних наук, доцент,  
**Безбах Ігор Віталійович**,  
Одеська національна академія харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України,  
кафедра процесів, обладнання та енергетичного  
менеджменту, доцент кафедри.

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

- кандидат технічних наук, доцент  
**Бандура Валентина Миколаївна**,  
Вінницький національний аграрний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
факультет механізації технологічних процесів, декан,  
кафедра автоматизації та комплексної механізації  
технологічних процесів, доцент кафедри.

Захист відбудеться 19 грудня 2017 р. о 10<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 Одеської національної академії харчових технологій, за адресою: вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039 в ауд. А – 234.

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

Автореферат розіслано " \_\_\_\_ " листопада 2017 року.

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

Т.І. Нікітчина

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Для сучасних процесів сушіння зернових продуктів характерні дві проблеми: високі енерговитрати й забруднення зерна продуктами згоряння. Витрати енергії на сушіння зернових продуктів вище, ніж енерговитрати на всі транспортні потреби та польові роботи. Тому доцільно шукати резерви зниження енергетичних витрат у процесах сушіння. В Україні в якості сушильного агента використовують суміш топкових газів і повітря, до 48 % виробників використовують шахтні сушарки при сушінні зерна. Безпосередній контакт продуктів згоряння із зерном погіршує його якість у зв'язку з можливим проникненням у продукт канцерогенних компонентів. Напрямок вдосконалення сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення якості продукту, що висушується, розробка високоефективної сушильної техніки. Можливості зниження витрат палива на сушіння не вичерпані, існують невикористані резерви. Досвід застосування у світовій практиці теплових труб і ротаційних термосифонів (РТС) дозволяє розраховувати на можливість створення на їхній базі енергоефективних і екологічно безпечних апаратів для термообробки зерна. Тому, розвиток наукової бази про механізми тепло- масообміну в апаратах із РТС і створення на їхній основі сушарок, методик їх розрахунку є актуальним. Аналіз питомих енерговитрат різних способів сушіння показує, що найменші питомі енерговитрати мають: інфрачервоне, надвисокочастотне (НВЧ), рекуперативне сушіння. Застосування цих типів сушарок або їхніх комбінацій у промисловості найбільш перспективне. До комбінованих відносять сушарки зі змішаним теплопідводом, а також сушарки, в яких використано традиційний тепловідвід і механічне видалення вологи. В роботі розглянуто два комбінованих способи сушіння. Перший спосіб включає комбінування рекуперативного підігріву зерна за допомогою термосифонного підігрівача й видалення вологи за допомогою повітря з навколишнього середовища. Другий спосіб включає комбінацію НВЧ енергопідводу та фільтраційного сушіння. Мінімізація питомих енергетичних витрат сушарок досягалась шляхом системної оптимізації й визначення раціонального сполучення конструктивно- компоновочних та режимних параметрів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана за тематикою держбюджетних досліджень проблемної науково-дослідної лабораторії Одеської національної академії харчових технологій № 8/15-П «Теорія і техніка сушіння термолабільної сировини при використанні інноваційних енергоефективних систем термотрансформації та адресної доставки енергії» (№ держреєстрації 0100U004570).

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є розробка організації комбінованих екологічних та енергонезатратних процесів сушіння зернових продуктів, розробка сушарки з НВЧ енергопідводом та сушильної установки на базі РТС, розробка методів розрахунку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити моделі для розрахунку процесів тепло- масообміну у сушарці на базі РТС та НВЧ;
- встановити кінетику сушіння дисперсних харчових продуктів комбінованими методами;
- визначити вплив режимних параметрів на кінетику сушіння зернових продуктів

ктів в апараті із РТС;

- визначити вплив режимних параметрів на кінетику сушіння зернових продуктів в сушарці з НВЧ енергопідводом;
- узагальнити експериментальні дані;
- визначити питомі енерговитрати розроблених сушарок;
- розробити інженерну методику розрахунку сушарки на базі РТС;
- провести обчислювальний експеримент, розрахувати конструктивні параметри сушарки з РТС, підготувати технічну документацію для впровадження;
- провести стендові випробування інноваційних зразків сушарок.

*Об'єкт досліджень* – процес сушіння дисперсних зернових продуктів.

*Предмет досліджень* – сушарки, що використовують комбіновані способи сушіння.

*Методи досліджень* – комплекс традиційних і сучасних фізичних і математичних методів досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В роботі вперше сформульовані та доведені наукові положення:

– Застосування комбінованої обробки зернових продуктів в полі НВЧ при узгодженні режимних параметрів процесу та властивостей сировини сприяє виникненню бародифузійного потоку пароводяної суміші на поверхні зернівки, а наступне механічне знімання вологи за допомогою фільтрації його повітрям приведе до зниження енерговитрат на сушіння дисперсних зернових продуктів.

– Рекуперативний спосіб підводу енергії при сушінні дисперсних зернових продуктів, заснований на застосуванні РТС, сприяє активному перемішуванню, зменшенню дифузійного шару, рівномірному прогріву зернового об'єму, за рахунок чого інтенсифікується тепломасоперенос.

В результаті аналітичних і експериментальних досліджень вперше:

- розроблено й запропоновано спосіб комбінованого сушіння в апараті на базі РТС;

- розроблено та запропоновано спосіб комбінованого сушіння в апараті з використанням НВЧ енергопідводу й фільтраційного сушіння;

- дано математичний опис кінетики сушіння, що дозволяє розрахувати коефіцієнти масовіддачі в сушарці на базі РТС;

- встановлено кінетичні залежності процесу сушіння дисперсних зернових продуктів у сушарці на базі РТС: визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора РТС до продукту; отримано та проаналізовано термограми зернового продукту та поверхні РТС в процесі сушіння; а також лінії сушіння;

- встановлено кінетичні залежності процесу сушіння дисперсних зернових продуктів у полі НВЧ в комбінації з механічним зніманням вологи з поверхні зернівки: отримано та проаналізовано термограми при сушінні; а також лінії сушіння;

- отримано залежність питомих енерговитрат на сушіння від температури поверхні конденсатора у сушарці на базі РТС;

- розраховано питомі енерговитрати на процес у сушарці на базі НВЧ;

- розроблено інженерну методику й комп'ютерну програму для розрахунку

сушарки на базі РТС;

- проведено комп'ютерне моделювання та оптимізацію процесу сушіння в сушарці на базі РТС.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичними й експериментальними дослідженнями та виробничими випробуваннями розроблено, встановлено й практично підтверджено:

- ефективність розробленої конструкції сушарки на базі РТС при сушінні зернових продуктів;

- ефективність розробленої конструкції сушарки з НВЧ при сушінні дисперсних харчових продуктів;

- коректність розробленої інженерної методики й комп'ютерної програми для розрахунку сушарки на базі РТС;

- можливість значного зниження енерговитрат сушарок за рахунок використання комбінованих способів сушіння.

Комп'ютерна програма може бути використана для проектування нової сушильної установки з РТС різної продуктивності. Розроблено проект науково-технічної документації на сушарку на базі РТС. Новизна технічних рішень дисертаційної роботи захищена 1 патентом України. Промислову апробацію сушарки на базі РТС проведено на підприємстві ПАТ «Enni Foods».

**Особистий внесок здобувача** полягає у плануванні та проведенні експериментів, виборі об'єктів та методів експериментальних досліджень, обробці та узагальненні отриманих науково обґрунтованих результатів у вигляді формування висновків та пропозицій, підготовці матеріалів досліджень до публікування, виконаних у співавторстві та самостійно, розробці технологій і нормативної документації, промислової апробації розроблених технологій. Особистий внесок здобувача підтверджується представленими документами та публікаціями.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях професорсько-викладацького складу ОНАХТ в 2006 – 2017 р., міжнародних науково-практичних конференціях: «Удосконалення процесів та обладнання хімічних та харчових виробництв» та «Інноваційні енерготехнології»; на Мінському міжнародному Форумі з тепломасообміну (2011р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» ХДУХТ, Харків (2011р.), регіональній науково-практичній конференції «Енергія Бізнес Комфорт» ОНАХТ, Одеса (2014р.).

**Публікації.** Матеріали дисертації, одержані результати та рекомендації щодо їх використання відображені у 26 наукових роботах, опублікованих автором, з них 16 публікацій у фахових виданнях України (в т.ч. 2 – у видання, які включено до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на корисну модель, 3 – у науково-практичних виданнях, 2 – у виданнях іноземних держав та у тезах 7 доповідей на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 128 найменувань (12 сторінок) та одного додатку (3 сторінки). Роботу викладено на 159 сторінках (без врахування змісту, додатків і списку використаної літератури), які включають 58 рисунків, 32 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено загальну характеристику роботи – актуальність теми, зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора, представлена апробація дисертаційної роботи, публікації автора.

У першому розділі «Сучасний стан питання» проаналізовано стан техніки для сушіння зерна, енерговитрати і якість зерна при сушінні. Показано, що в 48% випадків експлуатуються застарілі шахтні агрегати вітчизняного виробництва, досить високий відсоток використання шахтних сушарок закордонного виробництва – 38%. Близько 10% підприємств використовують вітчизняні й закордонні сушарки. Розглянуто принципи підвищення енергетичної ефективності технологій сушіння, переваги й недоліки існуючих конструкцій конвективних сушарок. Приведено класифікацію комбінованих способів сушіння. Комбіновані способи розділено на комбіновані зі змішаним підведенням теплоти й комбіновані, в яких суміщують підведення теплоти і різні способи видалення поверхневої вологи. Це такі способи, як фільтраційна, рекуперативна й фільтраційна з НВЧ. Проведено аналіз актуальних проблем, існуючих у галузі сушильних технологій, обґрунтовано актуальність пошуку нових методів сушіння сировини. Розглянуто перспективну технологію мікрохвильового нагрівання матеріалу. Обґрунтовано перспективність використання мікрохвильового нагрівання в сушильних установках, як самостійного джерела теплоти, так і в комбінації з іншими видами енергопідводу.

Пропонується два способи: комбінація НВЧ нагріву і фільтраційного сушіння; комбінування рекуперативного підігріву зерна за допомогою РТС й видалення вологи повітрям з навколишнього середовища. Принципову схему процесу представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схема комбінованих процесів сушіння з використанням НВЧ та нагрівання РТС.

Обидва способи представляють комбінацію теплового впливу на продукт та видалення вологи за допомогою холодного повітря з навколишнього середовища. Приведено принцип роботи сушарки з РТС. Сушарка з РТС – принципово нова конструкція, у якій енергопідведення до шару зерна відбувається за рахунок контакту з нагрітою поверхнею трубчастого модуля РТС. Енергія, що підводиться до випарника, перетворюється в енергію водяної пари, далі пара надходить у конденсатор, розміщений у корпусі. Пара конденсується й віддає енергію зерну. Конденсат повертається у випарник. Спосіб підводу енергії при сушінні дисперсних зернових продуктів, заснований на застосуванні РТС, сприяє активному перемішуванню, зменшенню дифузійного шару, рівномірному прогріву зернового об'єму, за рахунок чого інтенсифікується тепломасоперенос.

Застосування комбінованого сушіння дисперсних зернових продуктів в полі НВЧ при узгодженні режимних параметрів процесу та властивостей сировини сприяє виникненню бародифузійного потоку пароводяної суміші на поверхню зернівки, а наступне механічне знімання вологи за допомогою фільтрації його повітрям приведе до зниження енерговитрат на сушіння дисперсних зернових продуктів.

Завдання досліджень полягають у вивченні кінетики процесів сушіння запропонованими комбінованими способами.

Проведено аналіз режимів сушіння зерна в сучасних шахтних зерносушарках. Їх необхідно врахувати при дослідженні процесу сушіння зерна розроблених сушарках. Сушіння зернових у шахтних сушарках проводяться при температурах агента сушіння – 100...350 °С, зерна 45...60 °С. Пропонується експериментальні дослідження сушіння в сушарках проводити при режимах наближених до рекомендованих. Розглянуті методи розрахунку та математичні моделі тривалості сушіння, тепло-масообміну при сушінні в конвективних сушарках. Обґрунтовано необхідність розробки моделі розрахунку процесів у сушарці на базі РТС.

У **другому розділі** «Об'єкти та методи досліджень» викладена інформація про об'єкти та методи досліджень. В розділі наведено програму досліджень (рис. 2), розглянуто експериментальні методи досліджень.

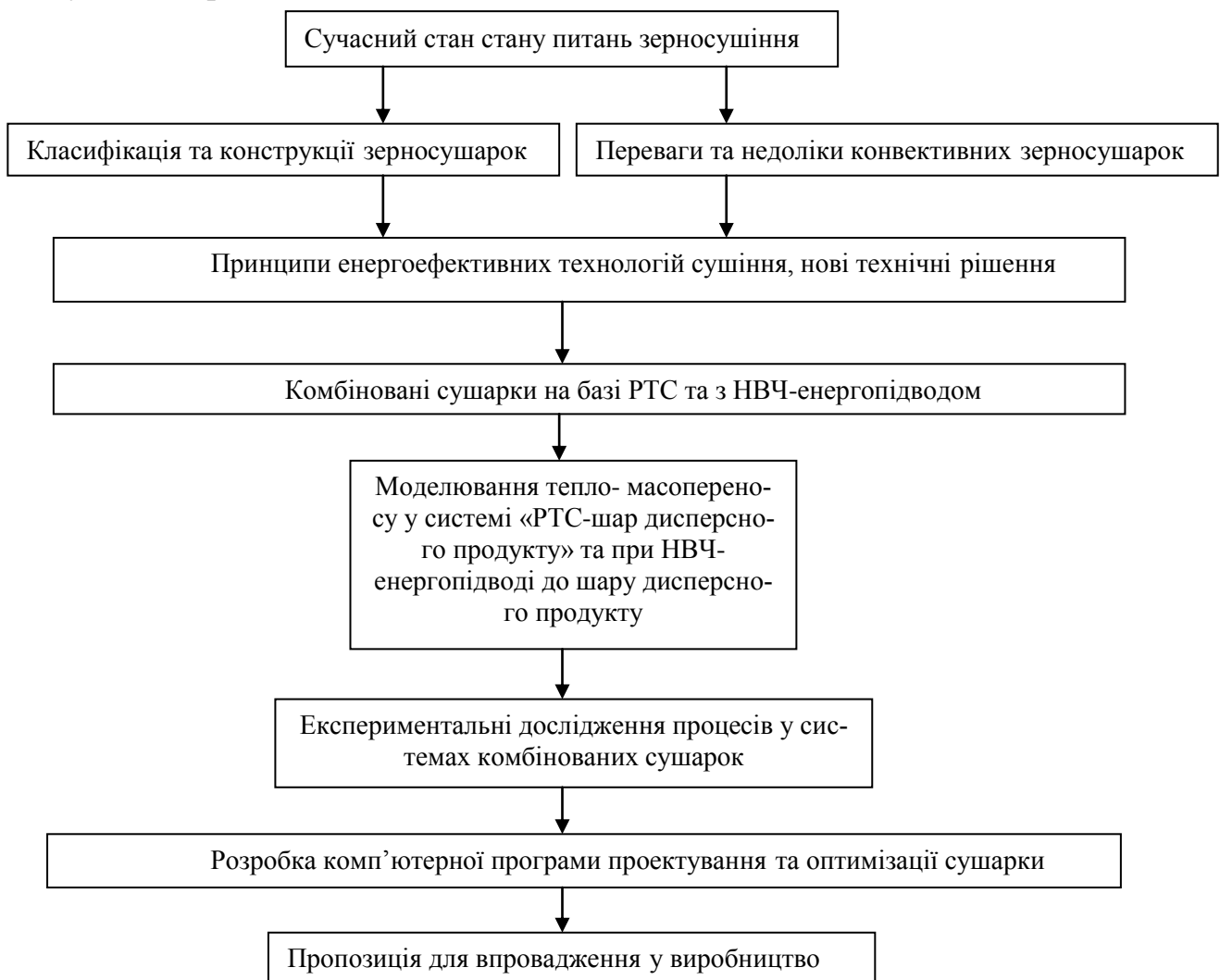


Рис. 2. Програма досліджень.

В якості досліджуваних матеріалів були обрані грубозернисті дисперсні продукти: пшениця, варений горох; дрібнозернисті: просо, амарант. Розглянуто поглинаючу ємність, теплофізичні властивості дисперсних продуктів, механічні властивості, вплив ударних навантажень на зміну якості зерна, термостійкість зерна, властивості вологого зерна при висиханні, гранично припустимі можливості видалення вологи.

Наведено методики досліджень тепло- масообміну, гранулометричного складу, визначення оцінки погрішності експерименту. Для дослідження процесів тепло-масообміну в зерносушарці на базі РТС розробили експериментальну установку (рис. 3).

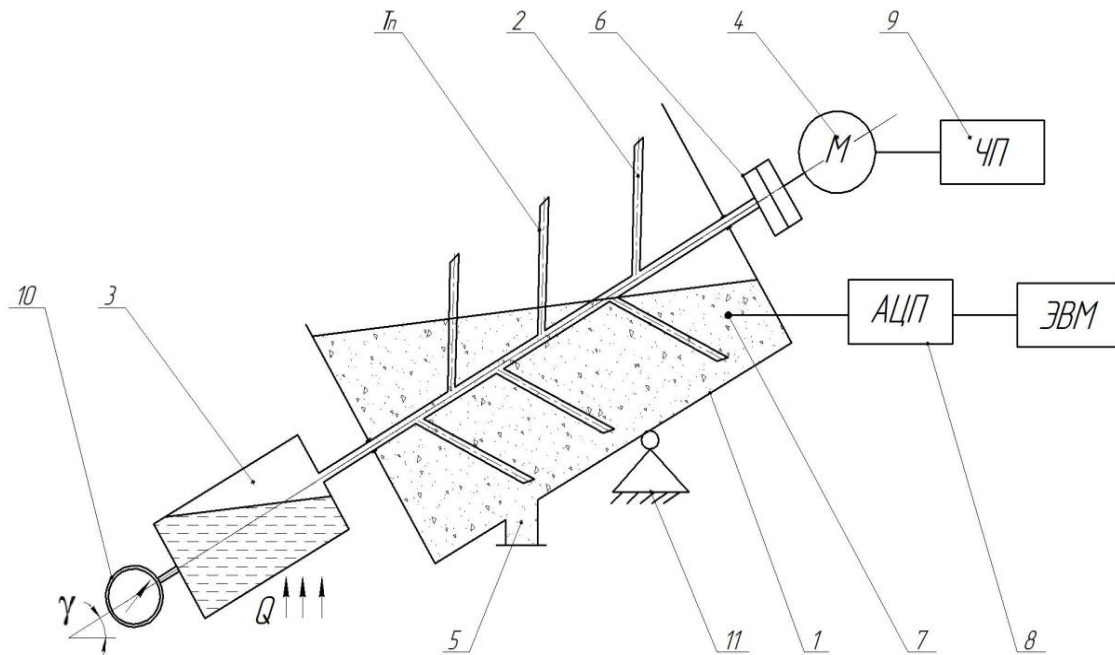


Рис. 3. Схема експериментальної установки з РТС: 1 – корпус, 2 – ротаційний термосифон, 3 – випарник, 4 – електродвигун, 5 – патрубок, 6 – муфта, 7 – термопара, 8 – аналого-цифровий перетворювач, 9 – частотний перетворювач, 10 – манометр, 11 – шарнір.

Дослідження проводились за періодичною схемою, продукт завантажували у корпус, проводили сушіння, після чого вивантажували. Варіювались режимні параметри: кут нахилу РТС  $\gamma$ ; частота обертів РТС,  $n$ ; тиск у конденсаторі РТС,  $P$ ; потужність, що підводиться (табл. 2).

Таблиця 2

**Діапазон вимірюваних величин**

Зерновий продукт	Нахил РТС, $\gamma$	Частота обертів РТС, $n$	Тиск в конденсаторі РТС, $P$	Потужність, що підводиться	Вологість продуктів початкова, $\omega_n$
	град.	$\text{хв}^{-1}$	МПа	кВт	%
Пшениця	30...45	14...28	0,05...0,15	0,8...1,5	20
Варений горох					25
Амарант					20
Просо					19

Початкова вологість продуктів вибиралась згідно технологічним вимогам  $\omega_n$ , %. Зволоження зерна перед дослідженнями, розрахунки коефіцієнтів тепло- масовіддачі проведено за стандартними методиками.

Для дослідження процесів тепло- масообміну в зерносушарці на базі НВЧ розробили експериментальну установку (рис. 4). Дослідження з сушіння проведено на пшениці, кукурудзі (табл. 3). Схема експериментального стенда наведена на рис. 4.

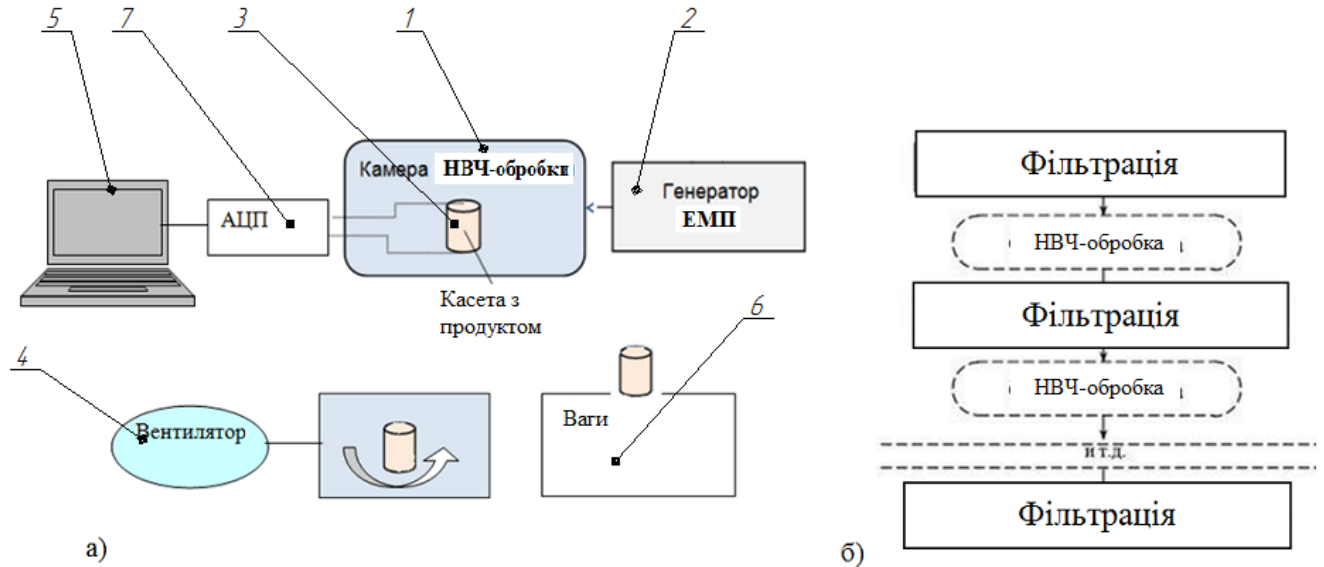


Рис. 4. Схема стенду та методика досліджень установки з НВЧ: 1 – камера НВЧ обробки, 2 – генератор електромагнітного поля, 3 – касета з продуктом, 4 – вентилятор, 5 – комп’ютер, 6 – ваги, 7 – модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП); а) конструкція стенду б) методика досліджень.

Таблиця 3

#### Діапазон вимірюваних величин

Зерновий продукт	Тривалість нагріву НВЧ	Тривалість продування повітрям	Потужність НВЧ, що підводиться	Вологість продуктів початкова, $\omega_n$
	с	с	кВт	%
Пшениця	3...60	15...90	0,56...1,2	20
Кукурудза				30

Дослідження проводили за періодичною схемою, спочатку проводили вплив НВЧ випромінюванням на продукт, після чого касета з продуктом продувалась повітрям і зважувалась. За допомогою модуля АЦП і термопар вимірювали температуру продукту тривалість НВЧ обробки, швидкість повітря.

Вологість зерна вимірювали за допомогою цифрового вологоміра РМ-600 та вологоміру типу Wile.

У **третьому розділі** «Експериментальне та аналітичне моделювання процесів тепло- масообміну в комбінованих сушарках» проведено аналіз механізму теплопереносу на границі ротаційного термосифону й шару, що рухається. Сформульовано основні принципи інтенсифікації тепловіддачі на границі «гріюча стінка - шар зерна». Отримано рівняння в диференційній формі для розрахунку коефіцієнту тепло-

віддачі. Інтенсифікуючий вплив шару, що рухається можна врахувати внутрішнім коефіцієнтом тепловіддачі ( $\alpha_i$ ) і часу контакту ( $\tau_k$ ). При стаціонарному процесі середній коефіцієнт тепловіддачі визначається:

$$\alpha = \frac{1}{\tau_k} \cdot \int_0^{\infty} \left( \frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\alpha_i} \right)^{-1} d\tau \quad (1),$$

де:  $\alpha_i$  - коефіцієнт тепловіддачі у нинішній момент часу,  $\tau_k$  - час контакту шару зерна із гріючою поверхнею.

Розглянуто кризу теплопередачі у РТС і вплив основних сил на конденсат. Відношення відцентрових сил до проекції сил тяжіння є шуканим відцентровим числом Фруда:

$$Fr_w = \frac{\omega^2}{R \cdot g \cdot \sin(\gamma + \beta)} \quad (2),$$

Проведено моделювання процесу сушіння в сушарці з РТС (рис. 5). Моделювання ускладнюється тим, що має місце дві фази. Перша – повітря, що рухається в міжзерновому просторі, друга – об'єм зерна, усередині сушарки.

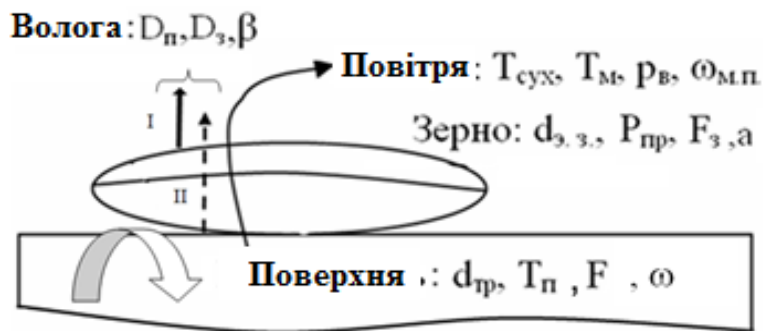


Рис. 5. Схема процесу сушіння зерна в сушарці на базі РТС.

Повітря є вологоносієм. Відбувається дифузія водяної пари в повітря. Параметри повітряного потоку: коефіцієнт дифузії водяної пари в повітря  $D_{п}$ ; швидкість повітря в міжзерновому просторі  $\omega_{м.п.}$ ; температура повітря  $T_{сух}$ ; температура мокрого термометра  $T_{м}$ ; тиск парціальний насиченої пари в повітрі  $p_{в}$ . Параметри матеріалу: тиск пари над поверхнею матеріалу  $P_{пр}$ ; площа зерна  $F_{з}$ ; еквівалентний діаметр зернівки  $d_{з. з.}$ . Ступінь нагрівання зерна визначається його теплофізичними властивостями – коефіцієнтом температуропровідності ( $a$ ), середньою вологістю ( $\omega_{сер}$ ). Зерно переміщується нагрітими трубками конденсатора РТС. Діаметр трубок  $d_{тр}$ . Площа поверхні конденсатора  $F$ . Температура поверхні конденсатора РТС –  $T_{п}$ . Кругова швидкість трубки модуля РТС –  $\omega$ .

Рухлива сила процесу сушіння в першому періоді – різниця парціальних тисків водяної пари над продуктом і в повітрі ( $P_{пр} - p_{в}$ ). Таким чином, у першому періоді сушіння, визначальними умовами для масовіддачі будуть умови на границі розділу фаз – режим руху повітря зовні зернівки, площа зернівки, температура поверхні конденсатора РТС. У другому періоді сушіння відбувається перенесення вологи в стиснутих умовах. Визначальний параметр – коефіцієнт дифузії вологи усередині зернівки  $D_{з}$ . Інтенсивність процесу масовіддачі прямо пов'язана з температурою нагрівання зерна.

Залежність коефіцієнту масовіддачі  $\beta$  від режимних факторів для I періоду отримана за допомогою методу аналізу розмірностей. Складено розмірну матрицю (табл. 4). Отримане рівняння в числах подібності має вигляд:

$$Nu_d = f \left[ Pe_T \cdot \left( \frac{t}{T} \right) \cdot \left( \frac{a}{D} \right) \right] \quad (3),$$

де:  $Nu_d$  – число Нусельта дифузійне;  $Pe_T$  – число Пекле теплове;  $t/T$  – симплекс температур;  $a/D$  – симплекс теплофізичних параметрів.

Таблиця 4

**Розмірна матриця**

Параметр	Символ	Розмірність
Коефіцієнт масовіддачі	$\beta$	$L \cdot \tau^{-1}$
Температура	$T$	$T$
Розмір частинки	$d$	$L$
Швидкість	$\omega$	$L \cdot \tau^{-1}$
Коефіцієнт дифузії	$D$	$L^2 \cdot \tau^{-1}$
Коефіцієнт температуропровідності	$a$	$L^2 \cdot \tau^{-1}$

Для одержання загального виду критеріальних рівнянь для НВЧ сушіння також використано метод аналізу розмірностей. Структура рівняння в безрозмірних змінних в загальному виді в умовах нерухливого шару сировини й потоку дифузійного середовища записується так:

$$Sh = A (Re)^n (Sc)^m (Bu)^k \quad (4),$$

де:  $Re$  – число Рейнольдса;  $Sc$  – число Шервуда;  $Bu$  – число Бурдо;  $n$ ,  $m$ ,  $k$  – коефіцієнти критеріального рівняння.

Константи в співвідношеннях (3-4) визначаються в результаті експериментального моделювання процесів сушіння.

Наведені результати досліджень, що проведені на експериментальних стендах кафедри процесів обладнання та енергетичного менеджменту ОНАХТ. При вимірюванні температури, дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП і вводилися в ПК. Отримано термограми при сушінні пшениці, амаранту, просо, вареного гороху в установці з РТС (рис. 6, 7).

На початку процесу сушарці із РТС уже відбувається інтенсивне пароутворення над поверхнею зерна. Температура зернового шару збільшується, що пов'язано зі зменшенням кількості вологи в зерні. Зерно сушили до стану нижче рівноважної вологості. Середня вологість повітря в лабораторії 80 %. Середня температура зерна в експериментах 60...80 °С за таких умов рівноважна вологість зерна 14...16 %. Період нагрівання для пшениці триває близько 1000 с, для різних температур поверхні РТС. Після чого температура зерна стабілізується графіки зміни температури набувають автомодельного характеру (рис. 6, 7).

Температури зерна в деяких експериментах перевищують технологічно припустимі при сушінні пшениці (рис. 7). Так при температурах конденсатора РТС 100...120 °С відбувається перегрівання зерна вище 60 °С, що перевищує технологічні вимоги.

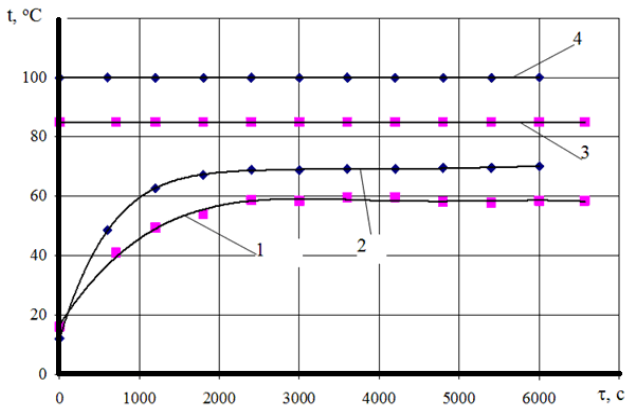


Рис. 6. Зміна температури вареного гороху та поверхні РТС: 1 – температура гороху,  $P=0,05$  МПа; 2 – температура гороху,  $P=0,1$  МПа; 3 – температура поверхні РТС,  $P=0,05$  МПа; 4 – температура поверхні РТС,  $P=0,1$  МПа.

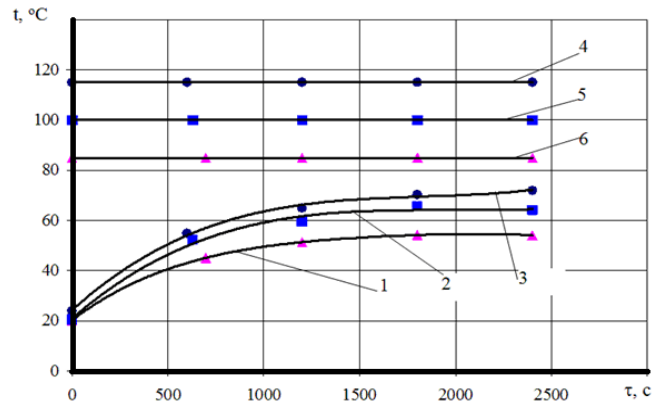


Рис. 7. Зміна температури пшениці та поверхні РТС: 1 – температура пшениці,  $P=0,05$  МПа; 2 – температура пшениці,  $P=0,075$  МПа; 3 – температура пшениці,  $P=0,1$  МПа; 4 – температура поверхні РТС,  $P=0,05$  МПа; 5 – температура поверхні РТС,  $P=0,075$  МПа; 6 – температура поверхні РТС,  $P=0,1$  МПа.

Такі режими обрані для того, щоб максимально розширити діапазон експериментальних значень, визначити можливості експериментальної установки.

Для зручності аналізу динаміки нагрівання різних зернопродуктів, температурні криві при однаковій температурі поверхні РТС і частоті обертання нанесені на одну діаграму (рис. 8, 9). Період прогріву гороху триває близько 2000 с, зерна пшениці - 1000 с. У порівнянні з іншими зерно продуктами, амарант прогривається найбільш динамічно, так уже через 600 з наступає автономність графіків. Якщо порівнювати з іншими зернопродуктами, то прогрів амаранту відбувається в 3,3 рази швидше гороху, в 1,7 разів швидше пшениці, що пояснюється його теплофізичними властивостями, а також розміром зерен.

Представлено криві сушіння пшениці в сушарці з РТС (рис. 9).

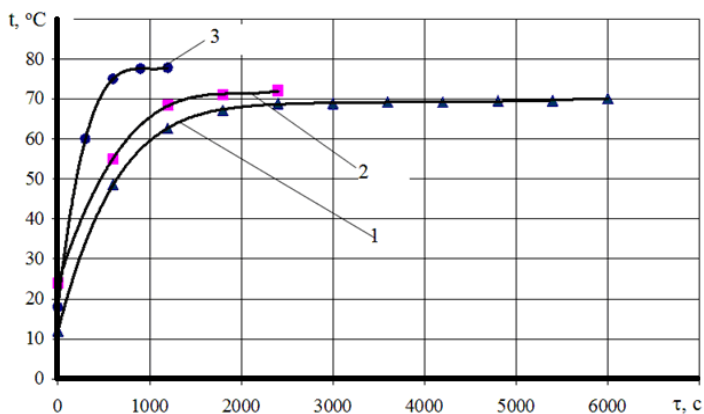


Рис. 8. Порівняння температур та динаміки нагріву для різних зернових продуктів при  $T_{п}=100$  °С та  $n=14$  об/хв: 1 – варений горох, 2 – пшениця, 3 – амарант.

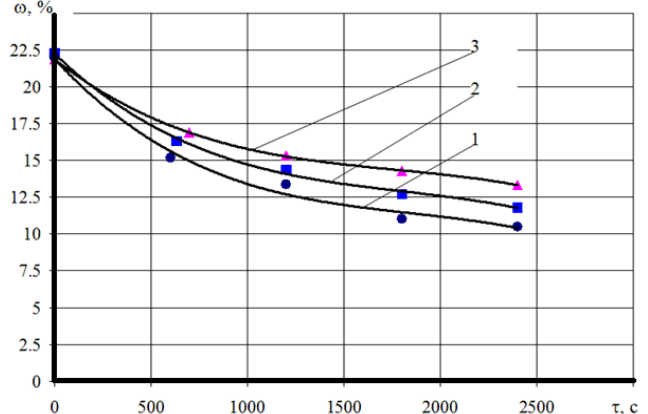


Рис. 9. Криві сушіння зерна пшениці при різних температурах поверхні РТС: 1 –  $T_{п}=115$ °С, 2 –  $T_{п}=100$ °С, 3 –  $T_{п}=85$ °С.

У процесі нагрівання зерна відбувається інтенсивне пароутворення на поверхні продукту, тому періоду прогріву матеріалу на кривій сушіння не спостерігається.

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

При сушінні вареного гороху в апараті з РТС сполучаються два технологічних процеси – сушіння й плющення вареного гороху. Необхідно було перевірити ступінь подрібнювання гороху й відповідність гранулометричного складу даного продукту технологічним вимогам. Дослідження гранулометричного складу проведено за методом ситового аналізу - шляхом механічного розділення матеріалу на фракції із частинками визначеного розміру. Варіаційні криві (рис. 10), показують, що продукт після сушіння в апараті із РТС містить більший відсоток менших фракцій, що задовольняє технологічні потреби виробництва.

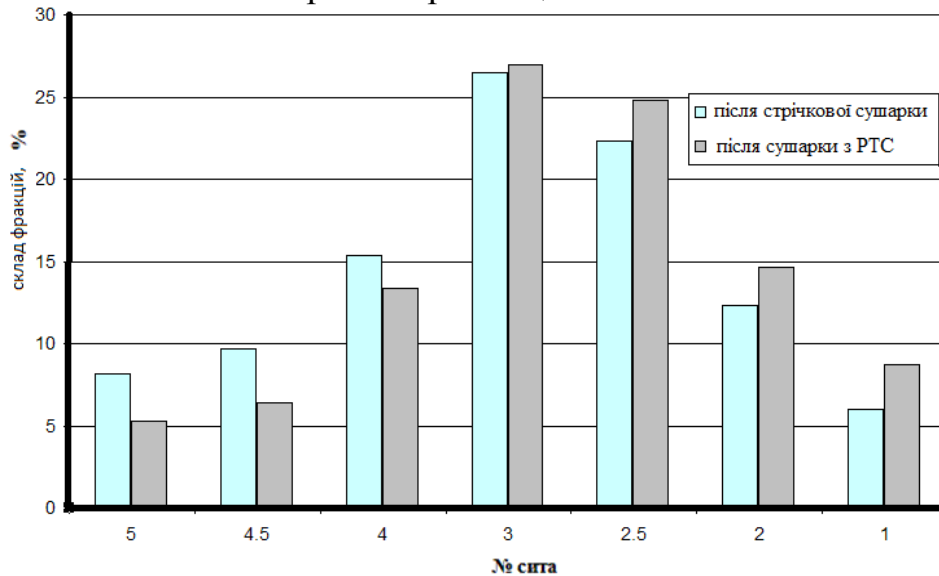


Рис. 10. Порівняння гранулометричного складу вареного гороху після сушіння в стрічкової сушарці та в сушарці з РТС.

Наведено результати по сушінню пшениці в сушарці з НВЧ (рис. 11, 12).

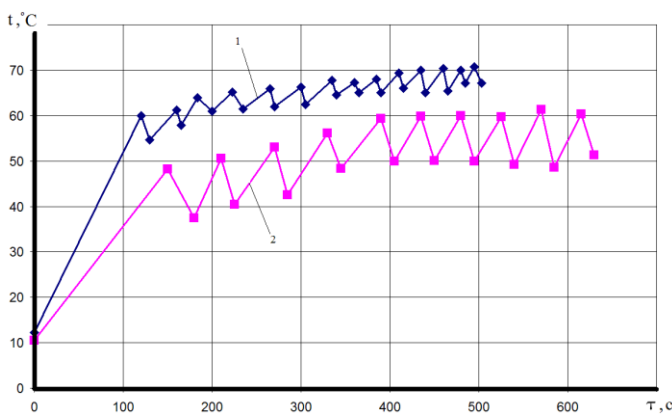


Рис. 11. Термограми при сушінні пшениці в сушарці з НВЧ: 1 – період продування 5 с, а впливу НВЧ 30 с, 2 – період продування 15 с, а впливу НВЧ 30 с.

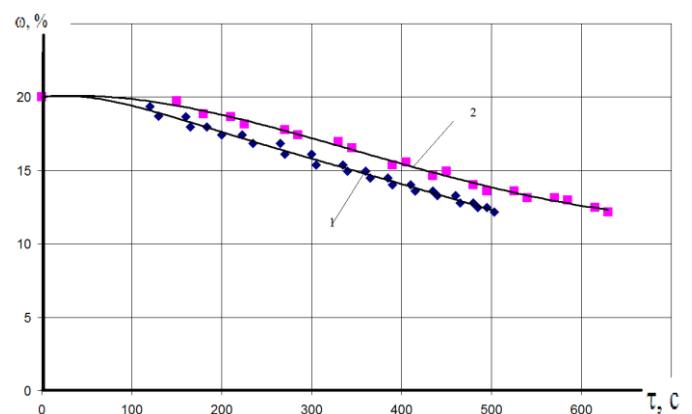


Рис. 12. Криві сушіння пшениці в сушарці з НВЧ: 1 – період продування 5 с, а впливу НВЧ 30 с, 2 – період продування 15 с, а впливу НВЧ 30 с.

Термограми при сушінні пшениці мають ступінчатий характер (рис. 12), це

викликано тим, що продування шару матеріалу проводили періодично. Крива 1 відповідає періоду продування 5 с, і впливу НВЧ 30 с, крива 2 – продування 15 с, і впливу НВЧ 30 с. Аналіз показує, що тривалість продувки має значний вплив як на температуру нагрівання зернового об'єму так і на швидкість сушіння.

Для пшениці збільшення тривалості продування в 2 рази призводить до збільшення швидкості сушіння в 1,2 рази.

Аналогічний вигляд мають термограми та криві сушіння для кукурудзи, але вплив на нагрівання менш суттєвий, а на швидкість сушіння більший. Для кукурудзи збільшення тривалості НВЧ-обробки на 5 с призводить до збільшення швидкості сушіння в 1,8 разів.

У **четвертому розділі** «Узагальнення експериментальних даних, інженерні методи розрахунку та апробація результатів роботи» наведені результати узагальнення експериментальних даних, комп'ютерного моделювання, алгоритми розрахунку, пропозиції до впровадження.

Експериментальні дані, отримані при сушінні пшениці в зерносушарці на базі РТС, є вихідними для математичного моделювання. Узагальнення результатів досліджень представлено в логарифмічних координатах. Послідовно отримано вплив кожного комплексу на процес. Визначено коефіцієнти рівняння в числах подібності для розрахунку числа Нусельта дифузійного. Рівняння має наступний вигляд:

$$Nu_D = 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Pe_T^{0.5} \cdot \left( \frac{T_n}{T_s} \right)^{0.4} \quad (5)$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними зафіксована в межах 20 %.

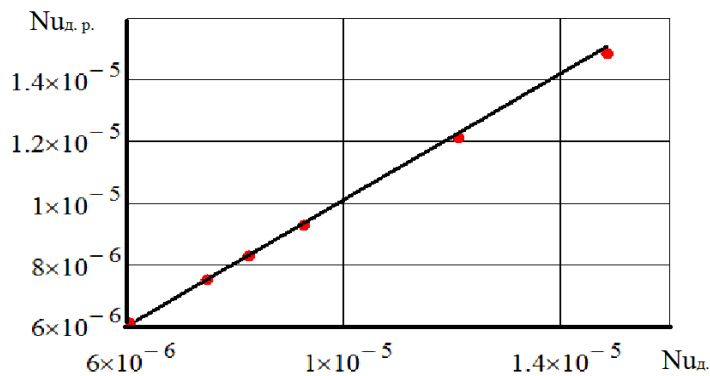


Рис. 13. Залежність між розрахованими та експериментальними числами Нусельта  $Nu_{d.p.} = f(Nu_d)$ .

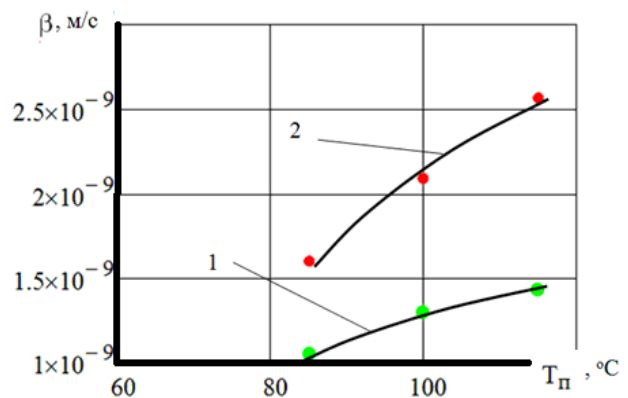


Рис. 14. Залежність коефіцієнта масовіддачі від температури поверхні РТС: 1 – при частоті обертів  $n=14$ об/хв, 2 – при частоті обертів  $n=28$ об/хв.

Отримано залежність коефіцієнта масовіддачі від середньої температури поверхні модуля (рис. 14). Зі збільшенням середньої швидкості обертання РТС, зростає значення коефіцієнта масовіддачі. Це пояснюється умовами обтікання потоку поверхні труби. Зміна частоти обертів РТС в 2 рази призводить до зростання коефіцієнта масовіддачі в 1,6 раз. Що пов'язане з оновленням контакту фаз, підвищенням активної поверхні вологовіддачі за рахунок перемішування об'єму зерна. Складено рів-

няння теплового балансу для сушарки з РТС, та проведено аналіз впливу кожного параметра на розподіл енергії в процесі сушіння. Отримано, що в порівнянні з конвективною сушаркою у сушилки на базі РТС більша частина енергії (70 %) витрачається на випарювання вологи, на нагрівання зерна 16,1 %, втрати в доквілля 13,9 % (рис. 15). Якщо рахувати енергію, витрачену на випарювання вологи, як корисну, то ККД конвективної сушарки – 40 %, сушилки на базі РТС – 70 %.

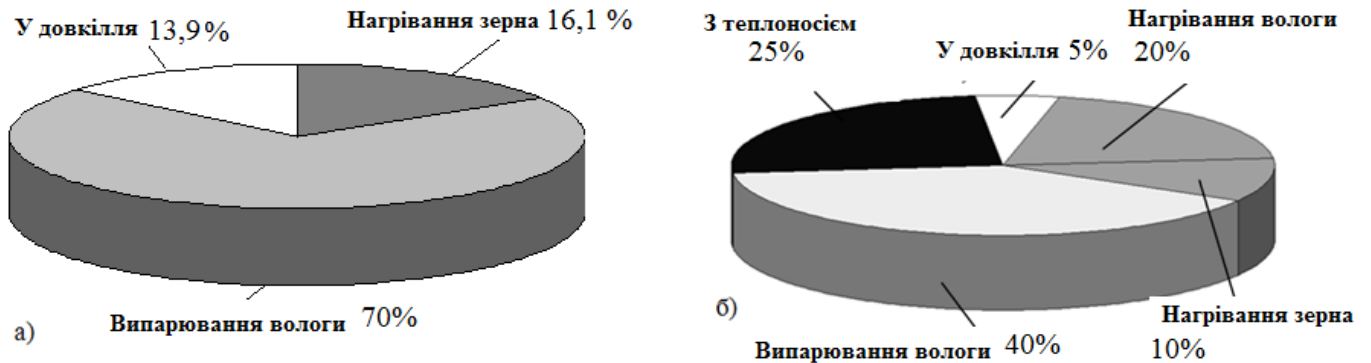


Рис. 15. Розподіл теплової енергії в зерносушарках: а) сушарка на базі РТС, б) конвективна зерносушарка.

Узагальнення даних за питомими енерговитратами сушарки з РТС і сушарки з НВЧ проведено із застосуванням програми MathCad. Енерговитрати нижче, ніж у традиційних конвективних сушарок. Питомі енерговитрати сушарки з РТС складають 3,8...4 МДж/кг, сушарки з НВЧ – 2,9...3,3 МДж/кг.

Алгоритм розрахунку сушильної установки представлено як сукупність окремих блоків (рис. 16). У блоці 3 розраховано параметри теплоносія в конденсаторі РТС. У блоці 4 визначено параметри зернового об'єму: еквівалентний діаметр зернівки, площа поверхні контакту, коефіцієнти дифузії та теплопровідності.

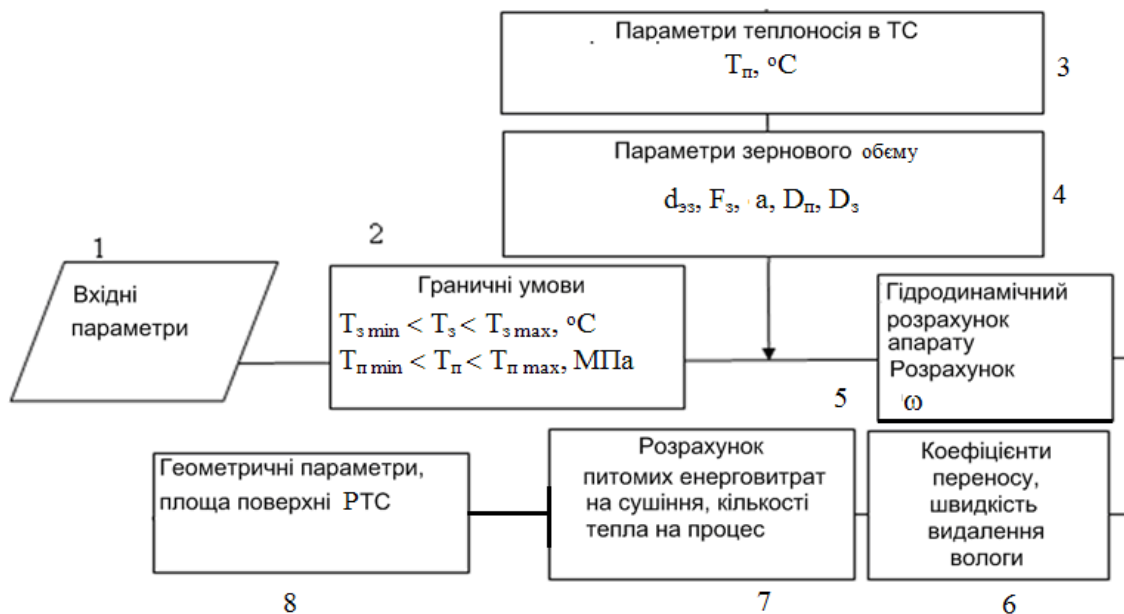


Рис. 16. Алгоритм розрахунку сушильної установки на базі РТС.

Дані блоків 2 - 4 є вихідними для подальших розрахунків. У блоці 5 використано рівняння 2 для визначення окружної швидкості трубки модуля РТС –  $\omega$ .

У блоці 6 використано критеріальне рівняння (5), отримане після узагальнення експериментальних даних. В блоці 7 визначено загальну кількість тепла на процес. У блоці 8 розраховано геометричні параметри апарату. Результатом розрахунку є геометричні параметри сушарки, площа поверхні РТС.

За результатами комп'ютерного моделювання розроблений експериментальний зразок сушильної установки (рис. 17).

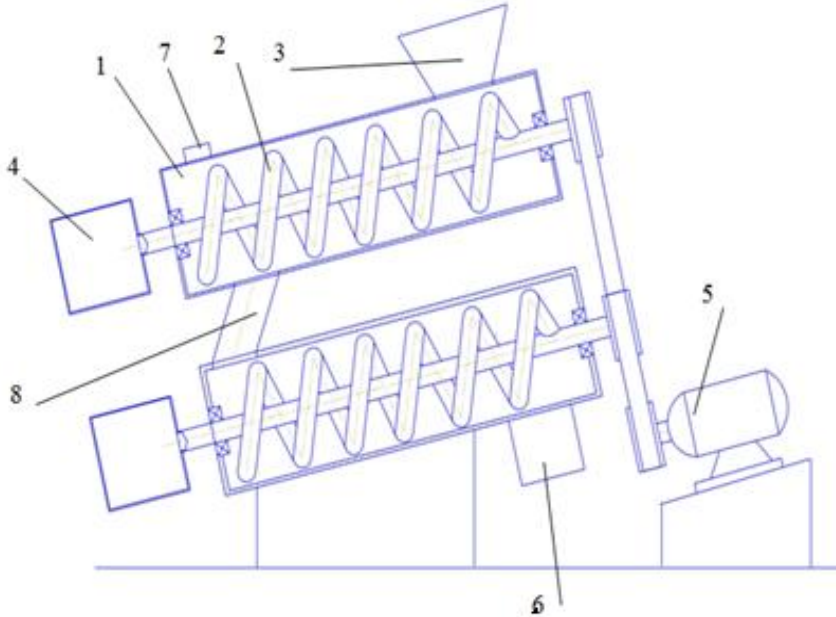


Рис. 17. Експериментальний зразок сушильної установки: 1 – корпус, 2 – ротаційний термосифон, 3 – воронка для завантаження дисперсного продукту, 4 – випарник, 5 – двигун, 6 – патрубок для вивантаження продукту, 7 – клапан, 8 – патрубок.

Технологічна схема виробництва варено-сушеного гороху на ПАТ «Enni Foods» передбачає установку двох стрічкових сушарок, що працюють послідовно. Між сушками відбувається плющення гороху.

На виробництві існує проблема: високе енергоспоживання сушарок і невисока надійність в роботі цих апаратів.

Таблиця 5

#### Технічні характеристики сушарки з РТС

Параметр	Значення
Продуктивність сушарки по вологій сировині, кг/с	0,12
Площа поверхні випарників РТС, м <sup>2</sup>	14
Тиск пари усередині РТС, МПа	0,3
Температура поверхні випарника РТС	133
Частота обертання РТС	2
Потужність приводу двигуна, кВт	5
Питомі енерговитрати на сушіння, МДж/кг	4

Значного скорочення енерговитрат можливо досягти, застосовуючи апарат з

РТС одночасно як сушарку і плющитель. За наведеним алгоритмом (рис. 16) розроблено проект сушарки для вареного гороху продуктивністю 0,12 т/год на підприємстві ПАТ «Enni Foods».

Використовування апарату з РТС як два апарати - і сушарки і плющителя - дає істотне зниження енерговитрат технологічної лінії — з 4,6 до 1 МДж/(кг продукції). Термін окупності сушарки складає 4 сезони.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено моделі процесів тепло- масообміну, що дозволяють узагальнити базу експериментальних даних та розробити алгоритми розрахунку комбінованих сушарок на базі РТС та НВЧ. Запропоновано конструкцію і розроблено методи розрахунку сушарки з РТС та конструкцію установки з використанням комбінації фільтраційної сушки з НВЧ нагріванням на основі аналітичних, експериментальних досліджень і результатів комп'ютерного моделювання. Сушарки забезпечують екологічно чисте сушіння зернових продуктів при підвищеній енергетичній ефективності установки.

2. Встановлено кінетику сушіння дисперсних харчових продуктів в установці з використанням комбінації фільтраційного сушіння з НВЧ нагріванням та в сушарці з РТС. Як об'єкти обробки обрані грубодисперсні й дрібнодисперсні зернові продукти. Експериментальні дослідження кінетики сушіння проведені на наступних продуктах: пшениця, кукурудза, вареносушений горох, просо, амарант.

3. Визначено вплив режимних параметрів на кінетику сушіння зернових продуктів в апараті із РТС. Встановлено вплив температури поверхні конденсатора РТС на ступінь нагріву зерна пшениці, амаранту в апараті при постійній частоті обертання РТС. Для пшениці: при збільшенні температури конденсатора РТС в 1,5 разів температура зернової маси змінюється в 1,5 рази. Для амаранту: при збільшенні температури конденсатора РТС в 1,2 разів температура змінюється в 1,2 рази. Порівняння динаміки нагріву зернопродуктів в сушарці з РТС показує, що прогрівання амаранту відбувається в 3,3 рази швидше за горох, в 1,7 разів швидше за пшеницю, що пояснюється його теплофізичними властивостями, а також розміром зернинок. Швидкість сушіння в апараті з РТС для пшениці складає 0,5 %/хв, для вареносушеного гороху 0,36 %/хв, для амаранту 0,6 %/хв.

4. Визначено вплив режимних параметрів на кінетику сушіння зернових продуктів в сушарці з НВЧ енергопідводом, а саме вплив тривалості продування та НВЧ нагрівання на швидкість сушіння. Для пшениці: збільшення тривалості продування в 2 рази призводить до збільшення швидкості сушіння в 1,2 рази. Для кукурудзи: збільшення тривалості впливу НВЧ на 5 с призводить до збільшення швидкості сушіння в 1,8 разів.

5. База експериментальних даних з кінетики сушіння пшениці в сушарці з РТС задовільно узагальнюється критеріальним рівнянням (5). З похибкою не більше 15% рівняння дозволяє розрахувати коефіцієнт масовіддачі  $\beta$  в межах  $1,2 \cdot 10^3 \leq Re_T \leq 1,3 \cdot 10^4$  та параметричного комплексу  $2,1 \leq T_{II}/T_3 \leq 3$ .

6. Розраховано питомі енерговитрати розроблених сушарок. Аналіз теплових балансів сушарок показує, що якщо вважати корисною енергію, яка витрачається

ся на випаровування вологи, енергетичний ККД конвективної сушарки складає 40%, а сушарки з РТС складає 70%. Результати експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання показують, що енерговитрати сушарки з РТС 3,8...4 МДж/кг, енерговитрати сушарки з НВЧ 2,9...3,3 МДж/кг, що суттєво нижче, ніж у існуючих конвективних сушарок.

7. Розроблено інженерну методику розрахунку сушарки на базі РТС. В основі методики лежить рівняння (5), отримане в результаті узагальнення експериментальних даних. Аналіз результатів розрахунку дозволяє вибрати геометричні параметри сушарки, площу поверхні РТС, раціональне сполучення числа апаратів, які забезпечать необхідні технологічні умови при прийнятних значеннях енергетичних витрат.

8. Проведений обчислювальний експеримент та узагальнення експериментальних даних з кінетики сушіння в апараті з РТС показує, що істотний вплив на коефіцієнт масовіддачі має частота обертання і температура поверхні РТС. Зміна температури поверхні РТС в 1,4 рази збільшує коефіцієнт масовіддачі в 1,8 рази. Це пов'язано із впливом температури поверхні РТС на температуру зернівки і, як наслідок, зі зростом парціального тиску пари над продуктом. Зміна частоти обертів РТС в 2 рази призводить до зросту коефіцієнта масовіддачі в 1,6 рази. Це пояснюється оновленням контакту фаз, підвищенням активної поверхні вологовіддачі за рахунок перемішування об'єму продукту.

9. Розроблено проект сушарки з РТС продуктивністю 0,12 кг/с для сушіння вареного гороху на підприємстві ПАТ «Enni Foods». Застосування апарату з РТС як і сушарки і плющителя дає істотне зниження енерговитрат технологічної лінії – з 4,6 до 1 МДж/(кг продукції). Термін окупності сушарки складає 4 сезони.

### Список праць, опублікованих за матеріалами дисертації

1. Бурдо, О. Г. Зволікати далі нікуди. На часі - енергоекономні схеми екологічно безпечних блочних зерносушарок [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Зиков, О. В. Воскресенська // *Зерно і хліб*. - 2005. - №4. – С. 18-19. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, сформульована наукова гіпотеза, підготована стаття до друку)*
2. Бурдо, О. Г. Енергоекономні проекти для конвективних зерносушарок [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Воскресенська // *Зерно і хліб*. - 2006. - №2. – С. 38-39. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, сформульована наукова гіпотеза, підготована стаття до друку)*
3. Бурдо, О. Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Воскресенська, В. І. Донкоглов // *Зернові продукти і комбікорми*. - 2006. - №2. – С. 48-53. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготована стаття до друку)*
4. Безбах, И.В. Сушка вареного гороха в апараті с вращающимся термосифоном [Текст] / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская, С.А. Марачева // *Наук. пр. ОНАХТ*. – Одеса, 2007. – Вип. 30, Т.1. – С. 226-228. *(особистий внесок здобувача - розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку)*
5. Безбах, И.В. Моделирование процесса сушки дисперсных пищевых продуктов в апараті с вращающимся термосифоном [Текст] / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // *Наук. пр.*

- ОНАХТ. – Одеса, 2008. – Вип. 34, Т.1. – С. 29-33. *(особистий внесок здобувача - участь в розробці математичної моделі, підготована стаття до друку)*
6. Воскресенська, О.В. Кінетика процесу сушіння зернових культур в термосифонно-механічному агрегаті [Текст] / О.В. Воскресенська // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2009. – Вип. 36, Т.1. – С. 79-82. *(особистий внесок здобувача - сформульовано наукову проблему, поставлено завдання досліджень, встановлення кінетичних залежностей, статтю підготовано до друку)*
  7. Воскресенская, Е.В. Особенности кинетики процесса сушки зерновых культур в термосифонно-механическом агрегате [Текст] / Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 81-84. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, поставлено завдання досліджень, встановлення кінетичних залежностей, статтю підготовано до друку)*
  8. Воскресенська, О. В. Перспективне все-таки видалення вологи із зернових у термосифонному агрегаті [Текст] / О. В. Воскресенська // Зерно і хліб. - 2010. - №4. – С. 28-29. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготована стаття до друку)*
  9. Зиков, О. В. Моделювання процесу сушіння амаранту в апараті з термосіфоном, що обертається [Текст] / О. В. Зиков, О. В. Воскресенська // Науковий вісник ЛНУВМтаБТ ім. С.З.Гжицького – Львів, 2011. – Вип. 4, Т.13. – С. 58-62 *(особистий внесок здобувача - участь в розробці математичної моделі, підготована стаття до друку)*
  10. Смирнов, Г.Ф. О приближённой модели сушки зернового слоя [Текст] / Г.Ф. Смирнов, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 69-76. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, сформульована наукова гіпотеза, підготована стаття до друку)*
  11. Зыков, А.В. Моделирование процесса сушки амаранта [Текст] / А.В. Зыков, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 355-358. *(особистий внесок здобувача - сформульовано наукову проблему, поставлено завдання досліджень, встановлення кінетичних залежностей, підготовано до друку)*
  12. Смирнов, Г.Ф. Обобщение экспериментальных данных сушки амаранта, тепловая модель сушки [Текст] / Г.Ф. Смирнов, А.В. Зыков, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.1. – С. 133-138. *(особистий внесок здобувача - розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку)*
  13. Смирнов, Г.Ф. О начальной стадии сушки зернового слоя в устройстве с вращающимся испарительным термосифоном [Текст] / Г.Ф. Смирнов, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.1. – С. 20-22. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготована стаття до друку)*
  14. Безбах, И.В. Исследование процесса сушки пшеницы в аппарате с вращающимся термосифоном [Текст] / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2014. – Вип. 45, Т.2. – С. 104-108 *(особистий внесок здобувача - сформульовано наукову проблему, поставлено завдання досліджень, встановлення кінетичних залежностей статтю, підготовано до друку)*
  15. Безбах, И.В. Повышение энергетической эффективности механических и термомеханических систем пищевых технологий [Текст] / И.В. Безбах, Н. И. Кепин, Е.В. Воскресенская // Научный журнал Института энергетики АНМ «Проблемы региональной энергетики» № 2(31) 2016г. – Кишинёв, 2016. – С.77-83. *(особистий внесок здобувача - розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку)*
  16. Безбах, І.В. Застосування термомеханічних систем в харчових технологіях [Текст] / І.В. Безбах, О.В. Воскресенська // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2016. – Вип. 1, Т.80. – С. 74-77.

*(особистий внесок здобувача - розроблено методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку)*

17. Пат. на корисну модель №97806 Україна, (2015) F26B 3/06 Пристрій для теплової обробки неньютонівських рідин [Текст] / О.Г. Бурдо, І.В. Безбах, О.В. Воскресенська: заявник і власник ОНАХТ. – № у 20 14 10091; заявл. 15.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №7. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, запатентована в співавторстві формула корисної моделі, оформлено матеріали та патент)*
18. Smirnov, H.F. The grain layer drying approximated model [Текст] / H.F. Smirnov, E.V. Voskresenskaya // Minsk International Seminar Heat Pipes Heat Pumps Refrigerators Power Sources MISHPHRPS-VIII, September 12-15, 2011 – Minsk, Belarus, 2011. – P. 203-208. *(особистий внесок здобувача - участь в розробці математичної моделі, підготовані доповідь та стаття)*
19. Безбах, И.В. Моделирование процесса сушки пшеницы в сушилке на базе вращающегося термосифона [Текст] / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // Міжнародна наукова конференція «Інноваційні енерготехнології». Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2015. – Вип. 47, Т.1. – С. 57-62. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготована стаття до друку)*
20. Бурдо, О. Г. Енергоекологічні проблеми зерносушіння [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Зиков, О. В. Воскресенська // Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Хлібопродукти - 2005». ОНАХТ. тези доп. – Одеса, 2005. – 25 с. *(особистий внесок здобувача - проведено літературний пошук, сформульована наукова гіпотеза, підготована тези до друку)*
21. Зиков, О. В. Розробка математичної моделі сушильної системи з термомеханічним агрегатом [Текст] / О. В. Зиков, О. В. Воскресенська // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» ХДУХТ, Харків 3-4 листопада 2011 р.: тези доп. – Харків, 2011. – 35 с. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготовано тези до друку)*
22. Смирнов, Г.Ф. Модель сушіння зернового шару [Електронний ресурс] / Г.Ф. Смирнов, О.В. Воскресенська // Матеріали МНПК «Інноваційні енерготехнології» ОНАХТ. тези доп. – Одеса, 2011. – 67 с. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготовано тези)*
23. Зиков, О.В. Моделювання процесу сушіння амаранту [Електронний ресурс] / О.В. Зиков, О.В. Воскресенська // Матеріали МНПК «Інноваційні енерготехнології» ОНАХТ. тези доп. – Одеса, 2011. – 353 с. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготовано тези)*
24. Смирнов, Г.Ф. Обобщение экспериментальных данных сушки амаранта, тепловая модель процесса сушки [Електронний ресурс] / Г.Ф. Смирнов, А.В. Зыков, Е.В. Воскресенская // Матеріали XIV Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» 3 – 7 вересня 2012р. – Одеса, 2012. – 237 с. *(особистий внесок здобувача - розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, сформульовано тези)*
25. Воскресенская, Е.В. Применение термосифонов в энергоэффективных сушильных технологиях [Електронний ресурс] / Е.В. Воскресенская // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт» 20 листопада 2014 р. ОНАХТ. тези доп. – Одеса, 2014. – 40 с. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготовано тези)*
26. Безбах, И.В. Моделирование процесса сушки дисперсных пищевых продуктов в аппарате с вращающимся термосифоном [Електронний ресурс] / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // Матеріали МНПК «Інноваційні енерготехнології» ОНАХТ. тези доп. – Одеса, 2015. – 235 с. *(особистий внесок здобувача - проведені експериментальні дослідження, їх аналіз та узагальнення результатів досліджень, підготовано тези)*

## АНОТАЦІЯ

**Воскресенська О. В. Комбіновані способи сушіння зернових продуктів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню комбінованих методів сушіння дисперсних зернових продуктів, розробці сушильної установки на базі РТС, методів її розрахунку.

Визначено недоліки існуючих конвективних зерносушарок: невисокий ККД (до 40%); малий питомий вологоз'єм; нерівномірність сушіння; високі витрати сушильного агента, високі енерговитрати. Запропоновано методи вирішення проблем сушіння - використання комбінованих технологій сушки, рекуператорів теплоти, термосифонів, теплових труб в технологіях сушіння, утилізації теплоти відхідних газів зерносушильних установок. Для оцінки запропонованих схемних рішень на основі аналітичних і експериментальних досліджень розроблені конструкції експериментальних установок: комбінована сушарка з РТС і комбінована сушарка з НВЧ. Як об'єкти обробки обрані крупнодисперсні і дрібнодисперсні харчові матеріали - зернові. Експериментальні дослідження кінетики сушіння проведені на наступних продуктах: пшениця, кукурудза, варений горох, просо, амарант. Розроблено методики експериментальних досліджень процесів гідродинаміки, тепло- масообміну в розроблених сушарках.

Аналітичні й експериментальні дослідження підтвердили, що зерносушарка забезпечує екологічно чисте сушіння зерна при підвищеній енергетичній ефективності. Встановлено, що на швидкість сушіння в зерносушарці впливає температура поверхні модуля, частота обертів РТС. Отримано математичний опис кінетики сушіння, модель у числах подібності для визначення питомих енерговитрат на сушіння, тривалості сушіння. Розроблено інженерну методику й комп'ютерну програму для розрахунку сушильної установки. Проведено комп'ютерне моделювання процесу сушіння в зерносушарці. Розроблено проект науково-технічної документації на зерносушарку.

**Ключові слова:** комбіноване сушіння, зерносушарка, коефіцієнт масовіддачі, термосифон.

## АННОТАЦИЯ

**Воскресенская Е. В. Комбинированные способы сушки зерновых продуктов. - Рукопись.**

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудования пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2017.

Диссертационная работа посвящена исследованию комбинированных методов сушки дисперсных продуктов, разработке сушильной установки, на базе вращающегося термосифона (ВТС), методов её расчета.

Анализ рынка зерносушильной техники показывает, что в Украине на долю шахтных сушилок приходится более 80% действующих установок с производительностью от 2 до 50 т/ч. Удельные энергозатраты таких сушилок 4...5 МДж/кг. Сушильные технологии Украины потребляют в 2,5...3 раза больше необходимой для превращения влаги в пар энергии. Необходима разработка энергоэффективных зерносушильных установок. Определены недостатки существующих конвективных зерносушилок: невысокий КПД (до 40%); малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие расходы сушильного агента, высокие энергозатраты. Предложены методы решения проблем сушки – использование комбинированных технологий сушки, рекуператоров теплоты, термосифонов, тепловых труб в технологиях сушки, утилизации теплоты уходящих газов зерносушильных установок.

Для оценки предложенных схемных решений на основе аналитических и экспериментальных исследований разработаны конструкции экспериментальных установок: комбинированная сушилка с ВТС и комбинированная сушилка с СВЧ. В качестве объектов обработки выбраны крупнодисперсные и мелкодисперсные пищевые материалы - зерновые. Экспериментальные исследования кинетики сушки проведены на следующих продуктах: пшеница, кукуруза, варёный горох, просо, амарант. Разработаны методики экспериментальных исследований процессов гидродинамики, тепло- массообмена в разработанных сушилках. Проведенные расчеты для всего диапазона исследований показали, что итоговая погрешность проведенных экспериментов не превышает 20% для доверительного интервала вероятности  $\alpha=0,95$ .

На основе принципов метода анализа размерностей разработаны модели процессов тепло- массообмена, позволяющие обобщить базу экспериментальных данных и разработать алгоритмы расчета комбинированной сушилки с СВЧ. Исследована кинетика сушки дисперсных зерновых продуктов в установке с использованием комбинации фильтрационной сушки с СВЧ нагревом. Установлено влияние продолжительности продувки и воздействия СВЧ поля на температуру продукта и скорость сушки. Так увеличение продолжительности продувки слоя пшеницы в 3 раза приводит к уменьшению температуры продукта в среднем на 10 °С. Для пшеницы: увеличение продолжительности продувки в 2 раза приводит к увеличению скорости сушки в 1,2 раза. Для кукурузы: увеличение продолжительности воздействия СВЧ на 5 с приводит к увеличению скорости сушки в 1,8 раза.

На основе аналитических, экспериментальных исследований и результатов компьютерного моделирования разработана конструкция и методы расчета сушилки с ВТС. На основе принципов метода анализа размерностей разработаны модели процессов тепло- массообмена, позволяющие обобщить базу экспериментальных данных и разработать алгоритмы расчета сушилки на базе ВТС.

Исследована кинетика сушки дисперсных пищевых продуктов в установке с ВТС. Установлено влияние температуры поверхности конденсатора ВТС на степень нагрева зерна пшеницы, амаранта в аппарате при постоянной частоте вращения ВТС. Для пшеницы: при увеличении температуры конденсатора ВТС в 1,5 раза тем-

пература пшеницы изменяется в 1,5 раза. Для амаранта: при увеличении температуры конденсатора ВТС в 1,2 раза температура зерна изменяется в 1,2 раза.

Определено влияние режимных параметров на скорость сушки в аппарате с ВТС для пшеницы составляет 0,5 %/мин, для вареного гороха 0,36 %/мин, для амаранта 0,6 %/мин. Влияние на скорость сушки оказывает изменение температуры поверхности и частоты вращения конденсатора ВТС. Влажность зерна в серии опытов снижается в среднем на 10 %, что соответствует стандартным зерносушилкам.

Скорость сушки просо в аппарате с ВТС составляет около 0,004 %/с. Для сравнения проведены эксперименты по сушке просо в конвективной сушилке при одинаковой температуре продукта (60 °С). Скорость сушки просо в конвективной сушилке составляет около 0,002 %/с, что в 2 раза ниже скорости сушки в аппарате с ВТС.

Анализ полученных вариационных кривых для варёного гороха (рис. 10), показывает, что продукт после сушки в аппарате с ВТС содержит больший процент тонких фракций (в среднем на 3 %), что удовлетворяет технологические потребности производства.

Существенное влияние на коэффициент массоотдачи имеет частота вращения и температура поверхности ВТС. Изменение температуры поверхности ВТС в 1,4 раза приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,8 раз (рис. 14). Что связано с влиянием температуры поверхности ВТС на температуру зерновки и, как следствие, с ростом парциального давления пара над продуктом. Изменение частоты оборотов ВТС в 2 раза приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,6 раз (рис. 14). Что объясняется обновлением контакта фаз, повышением активной поверхности влагоотдачи, за счет перемешивания объема продукта.

База экспериментальных данных по кинетике сушки пшеницы в сушилке с ВТС удовлетворительно обобщается критериальным уравнением (5). С погрешностью не более 20 % уравнение позволяет рассчитать коэффициент массоотдачи  $\beta$  в пределах  $1,2 \cdot 10^3 \leq Re_T \leq 1,3 \cdot 10^4$ , и параметрического комплекса  $2,1 \leq T_{II}/T_3 \leq 3$ .

Анализ тепловых балансов сушилок показывает, что если считать полезной энергию, которая затрачивается на испарение влаги, энергетический КПД конвективной сушилки составляет 40%, а разработанной сушилки с ВТС 70%. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования показывают, что энергозатраты сушилки с ВТС 3,8...4 МДж/кг, что ниже, чем у существующих конвективных сушилок. Энергозатраты сушилки с СВЧ 2,9...3,3 МДж/кг. Разработан проект сушилки с ВТС производительностью 0,12 кг/с для сушки варёного гороха на предприятии ПАО «Enni Foods». Применение аппарата с ВТС в качестве и сушилки и плющителя даёт существенное снижение энергозатрат технологической линии — с 4,6 до 1 МДж/(кг продукции). Срок окупаемости сушилки составляет 4 сезона.

**Ключевые слова:** комбинированная сушка, зерносушилка, коэффициент массоотдачи, термосифон.

**ANNOTATION**

**Voskresenskaja E.V. Combined methods of drying of grain products.** - The manuscript.

Processes and Equipments of Food, Microbiological and Pharmaceutical Productions. – Odessa national academy of food technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2017.

The dissertation is devoted to the reasearch of combined methods of grain drying and development of the dryer on the basis of the RTS and the methods of its calculation.

Defects of existing convective grain dryers are defined: low efficiency (up to 40%); low specific moisture release; uneven drying; high costs of drying agent, high energy costs. The methods for solving drying problems are proposed - the use of combined drying technologies, heat recuperators, thermosyphons, heat pipes in drying technologies, utilization of the heat of exhaust gases from grain dryers. To evaluate the proposed circuit solutions based on analytical and experimental studies, designs of experimental instalations have been developed: a combined dryer with rotating thermosyphon and a combined microwave dryer. Large-dispersed and fine-dispersed food materials - cereals - were chosen as treatment objects. Experimental studies of the kinetics of drying were carried out on the following products: wheat, maize, boiled peas, millet, amaranth. Methods for experimental studies of the processes of hydrodynamics, heat-mass transfer in developed dryers have been developed.

Analytical and experimental studies confirmed that the grain dryer delivers ecologically clean grain drying with high energy efficiency. It was found that the rate of drying in the dryer affects the temperature of the module surface, the amount of grain and RTS rate of turn-over. The mathematical description of the kinetics of drying was developed to similarity numbers engineering method and computer program for calculating the dryer. A computer simulation of the drying process in grain dryer was calculated. The project of scientific and technical documentation of the dryer was developed.

**Keywords:** drying, grain dryer, the mass-transfer coefficient, thermo-siphon.