

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ



**ПАЗЮК ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 664.723.047

**ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СУШІННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,  
академік НАН України  
**Снежкін Юрій Федорович**,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
директор ІТТФ НАН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Горобець Валерій Григорович**  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України МОН України,  
завідувач кафедри теплоенергетики

доктор технічних наук, професор  
**Гапонюк Ігор Іванович**,  
Національний університет харчових технологій  
МОН України,  
професор кафедри технології зберігання і  
переробки зерна

доктор сільськогосподарських наук, старший науковий  
співробітник  
**Кузнєцова Інга Вадимирівна**  
Національна академія аграрних наук України  
заступник академіка-секретаря відділення рослинництва

Захист відбудеться «18» вересня 2019 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст (Желябова), 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Булаховського, 2, корп. 2.

Автореферат розісланий « 6 » серпня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,  
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність теми**

Україна велика аграрна держава, що потребує якісного насінневого матеріалу при виробництві зернових, олійних та овочевих культур. Орієнтовна середньорічна потреба в аграрному секторі в насінні складає 6,5 – 7 млн. т., із них зернових та олійних – 4 млн. т., овочевих 2,5 – 3 млн. т.

Підвищення схожості насінневого матеріалу зернових та олійних культур в загальнодержавному масштабі дозволить збільшити прибуток від зменшення витрат насінневого матеріалу і суттєво підвищити врожайність.

Проблемі сушіння насінневого матеріалу присвячені праці багатьох дослідників, але ними не розроблена концепція комплексного підходу для збереження насінневих властивостей матеріалів. Окремі дослідження авторів не дають однозначних рекомендацій із сушіння насіння зернових та олійних культур, насіння овочевих культур та цукрового буряку мало досліджені, що вимагає розробки загальних теплотехнічних основ сушіння насінневого зерна.

Високі енергетичні витрати на процес сушіння пов'язано з тим, що при сушінні однієї тони висушеного продовольчого зерна витрачається в середньому біля 12 кг умовного палива або 60 – 80% від загальних енергетичних витрат на виробництво насіння. При сушінні зерна насінневого призначення витрати теплоти збільшуються в 1,3 – 1,4 рази в порівнянні з продовольчим зерном, що пов'язано з особливими вимогами до якості зерна та із зміною біохімічних і структурно-механічних властивостей матеріалу.

Проблема зменшення енергетичних втрат на виробництво насінневого матеріалу розв'язується через ідею створення нового технологічного обладнання, ефективного використання теплоти в процесі сушіння, вдосконаленням технології сушіння.

При виробництві насіння овочевих культур виникає проблема утилізації відходів м'якоті та шкірки, що для деяких селекційних господарств є екологічною проблемою. Існуючий стан проблеми комплексно вирішується через раціональне використання енергетичних та сировинних ресурсів з розробкою нових енергоефективних безвідходних технологій та обладнання із використанням теплових насосів.

Тому виникає необхідність розробки теплотехнічних основ сушіння насінневого матеріалу із застосування енергоефективних режимів і розробки теплотехнологій та обладнання для виробництва насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України, за наступними пошуковими тематиками: «Конденсаційний метод сушіння зернових матеріалів з використанням теплонасосної зерносушарки» (0109U002801), «Енергоефективні методи переробки рослинної сировини для отримання функціональних харчових порошоків» (0112U000453) автор дисертаційної роботи був відповідальним виконавцем.

### **Мета і задачі дослідження**

теоретичне та експериментальне обґрунтування теплотехнічних основ сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, створення безвідходних, ресурсозберігаючих теплотехнологій та розробка енергоефективного сушильного обладнання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **задачі дослідження**:

- на основі проведення літературного огляду проаналізувати сучасний стан наукових та практичних досліджень із сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур і встановити причину низької ефективності процесу;
- дослідити кінетику сушіння насінневого матеріалу за розробленою класифікацією;
- дослідити якісні характеристики насінневого матеріалу від режимів сушіння;
- розробити математичну модель процесу сушіння зернових культур та вивести регресійні рівняння із побудовою поверхні відгуку від впливу факторів на тривалість сушіння, схожість та температуру нагрівання насіння;
- виконати теоретичний розрахунок кінетики сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур і отримати узагальнені характеристики кінетики процесу в другому періоді сушіння з визначенням коефіцієнтів та відносних коефіцієнтів сушіння, узагальненої швидкості сушіння;
- розрахувати теоретичну тривалість сушіння та провести порівняння з експериментальними даними кінетики процесу сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур;
- визначити теплофізичні характеристики насіння олійних та овочевих культур;
- дослідити тепломасообмінний процес зневоднення насінневих матеріалів з урахуванням властивостей матеріалу і режимів сушіння;
- розробити енергоефективні низькотемпературні режими сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур із зниженим вологовмістом теплоносія;
- розробити сушильні стенди із тепловим насосом та дослідити кінетику сушіння в енергоефективних низькотемпературних режимах сушіння із зниженим вологовмістом теплоносія насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур;
- дослідити якісні характеристики насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур при сушінні в енергоефективних режимах із зниженим вологовмістом теплоносія на сушильних стендах із тепловим насосом;
- розробити нові ресурсоенергозберігаючі теплотехнології отримання насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур;
- розробити енергоефективну теплотехнічну схему роботи п'ятизонної зерносушарки із тепловим насосом для сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур;
- провести виробничу апробацію запропонованих науково-технічних рішень.

**Об'єкт дослідження** – тепломасообмінні процеси при сушінні насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

**Предмет дослідження** – насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, закономірності впливу режимів сушіння на інтенсивність і енергоефективність процесу та якість насіння.

**Методи досліджень** - аналітичні, фізико-технологічні, дослідні, розрахунково-статистичні, теоретичні із застосуванням систем автоматизації і комп'ютерних технологій.

При проведенні досліджень кінетики сушіння насіння застосовували експериментальні методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів процесу: час проведення досліду, температура теплоносія, маса та температура нагрівання матеріалу за допомогою автоматизованих систем збору та обробки інформації в розроблених програмах "Sooshka", та "System0" на спеціально спроектованих і виготовлених установках. Для обробки експериментальних даних використовувались методи математичного планування експерименту, а отримані дані оброблялись у сучасних інтегрованих системах Excel та Mathcad 5.

Для оцінки якості насіння використані стандартні методи досліджень передбачені ДСТУ 2240 – 2002, ДСТУ 4138 – 2002.

Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепломасообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

- експериментально встановлено та обґрунтовано вплив параметрів конвективного сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур на інтенсивність їх зневоднення та схожість;
- вперше визначені рівняння регресії насіння зернових культур із побудовою поверхні відгуку від трьохфакторного впливу на тривалість сушіння, схожість та температуру нагрівання насіння;
- вперше визначено граничнодопустима температура нагрівання насіння зернових культур за даними експериментальних досліджень кінетики процесу та якісних характеристик матеріалу;
- вперше розроблено та визначено вплив ступеневих режимів на кінетику сушіння та схожість насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур;
- вперше встановлений вплив зниженого вологовмісту теплоносія на кінетику сушіння для насіння зернових, олійних та технічних культур;
- встановлено вплив кінетики сушіння на якість насіння пшениці, ячменю, вівса, ріпаку, сої та гарбуза в сушильному стенді з тепловим насосом із визначенням питомих витрат теплоти;
- із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння;
- отримані формули розрахунку узагальненої швидкості та тривалості сушіння насіння зернових, олійних, овочевих і технічних культур;
- вперше визначено теплоємність насіння сої та гарбуза;
- вперше визначено питому теплоту випаровування методом синхронного теплового аналізу при сушінні насіння гарбуза;

- встановлені закономірності зміни тепломасообмінних параметрів в процесах сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур із визначенням температурного коефіцієнту, теплового потоку, коефіцієнту теплопередачі, критеріїв Ребіндера, Нусельта.

### **Практичне значення одержаних результатів**

- на основі проведених комплексних досліджень розроблена інженерна номограма визначення граничнодопустимої температури нагрівання насіння зернових культур;

- розроблені енергоефективні режими для сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур;

- розроблена енергоефективна теплотехнологія сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур із застосування енергоефективних режимів та введення в технологічний процес додаткової зони тепломасообміну після нагрівання матеріалу;

- розроблена комплексна енергоефективна теплотехнічна схема шахтної зерносушарки ТН -15,5 сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур із застосуванням теплового насоса та газового двигуна генератора з комплексним використанням теплоти утилізації димових газів і системи охолодження двигуна генератора;

- проведений техніко-економічний розрахунок впровадження і експлуатації низькотемпературних систем в зерносушарці ТН -15,5 із використанням теплового насоса та газового двигуна генератора в порівнянні з газовим теплогенератором RIELLO;

- розроблені енергоефективні безвідходні теплотехнології та обладнання переробки овочевих культур з отриманням насіння та харчового порошку.

За матеріалами розробки нових теплотехнологій та обладнання було отримано 3 патенти на винахід, розроблено та затверджено 4 ТУ України.

За результатами роботи впроваджені розроблені технології та обладнання на 3-х підприємствах: фермерське господарство “Євгенія” (Кіровоградської обл.), “Людмила-агро” (Вінницької обл.) і на ТОВ “Іжа майбутнього” (м. Київ).

Впровадження результатів роботи підтверджені відповідними актами.

### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні і доказі наукових положень, постановці та проведенні експериментальних досліджень і отриманні наукових результатів вказаних у дисертації. Також автор брав активну участь у створенні нових методик, формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів досліджень.

Положення опублікованих в співавторстві з колегами і використаних в дисертації статей належать автору на основі рівноправного партнерства.

Особистий внесок здобувача підтверджується представленими документами і науковими публікаціями.

### **Апробація результатів дисертації**

Головні результати теоретичних та експериментальних досліджень включались у програми, докладались і отримали позитивну оцінку на:

IV Міжнародній науково-практичній конференції „Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов)” (Росія, м. Москва, МДАУ, 2011); XIV Мінському між. форумі по тепло- і масообміну «ММФ 2012» (Беларусь, м. Мінськ 2012), Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання-запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (м. Київ, НУХТ, 2012), Міжнародному конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 2012), XII Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах» (м. Вінниця, ВНАУ, 2012), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии (НЭРПО-2013)» (Росія, м. Москва, МДВУ, 2013), XIII міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах» (м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 2014), I Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології харчових виробництв» (м. Вінниця, ВНАУ, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (м. Харків-Мелітополь-Кирилівка, ТДАТУ, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоощадні машини і технології» (м. Київ, КНУБ, 2015), IX Міжнародній конференції «Проблемы промышленной теплотехники» (м. Київ, ІТТФ-НУХТ, 2015), Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (м. Одеса, ОНАХТ, 2016), XV Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах» (м. Полтава, ПДАА, 2016), V Міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної, екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, ВНАУ, 2016), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні аспекти розвитку техніки, енергетики та транспорту АПК» (м. Вінниця, ВНАУ, 2017), II Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (м. Харків-Мелітополь-Кирилівка, ТДАТУ, 2017), VII Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності» (м. Київ, НУХТ, 2018), XVII Міжнародній конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (м. Одеса, ОНАХТ, 2018), Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, ХДУХТ, 2019), XI Міжнародній конференції «Проблемы промышленной теплотехники» (м. Київ, ІТТФ-НУХТ, 2019).

### **Публікації**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 45 наукових працях, в тому числі: 3 монографії, 25 статей (7 статей у наукометричних базах *Index Copernicus*, *SCOPUS*, *WEB OF SCIENCE*, 23 статті у фахових виданнях за переліком МОН України), 10 тез та матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях, одержано 3 патенти України на винахід та розроблені 4 ТУ України.

## **Обсяг і структура дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота викладена на 382 сторінках і складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 258 найменувань та 5 додатках. Основний зміст і результати роботи викладено на 330 сторінках, містить 166 рисунків і 56 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і основні завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

В **першому розділі „Сучасний стан проблеми енергоефективності процесів сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур”** представлений аналіз сучасних світових тенденцій з розвитку наукових досліджень із сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

Проблемою сушіння насінневого матеріалу присвячені праці наступних дослідників: Г.М. Станкевича, В.І. Атаназевича, В.М. Атаманюка, М.Г. Голика, М. Soares, М. Jorge, F. Montanuci, M. Markowsky, W. Sobieski, I. Konopka, D. Broker, J. Franca Neto, F. Krzyzanowski, S. Afrakhteh, E. Frahmandfar, A. Hamidi, H. Ramandi, K. Sacilik, R. Guiné, F. Pinho, M. Barroca та ін.

На основі аналізу літературного огляду робіт, які присвячені проблемам сушіння насіння, обґрунтовано висновок, що найбільш досліджене насіння зернових та олійних культур, сушіння насіння овочевих культур та цукрового буряку майже не проводились. В зазначених дослідженнях кінетики процесу сушіння майже не вказуються якісні показники насіння та раціональні режими сушіння.

Встановлено, що наявні режими сушіння в існуючих сушильних установках не забезпечують потрібної якості насіння і характеризуються високими питомими витратами теплоти.

Науковою основою для розвитку сучасних досліджень підвищення енергоефективності сушіння зерна стали праці А.В. Ликова, А.С. Гінзбурга, В.В. Краснікова, Г.К. Філоненко, М.О. Грішина, В.І. Жидко, В.А. Резчикова, М.І. Маліна, Ю.Ф. Снежкіна, Ж.О. Петрової, Г.К. Станкевича, І.І. Гапонюка, О.Г. Бурдо, В.І. Атаназевича, В.С. Уколова, М.В. Остапчука, Г.М. Окуня та інших вчених.

Світові передумови у підвищенні енергоефективності сушіння насінневих матеріалів спрямовані на розробку раціональних режимів сушіння, використання відновлювальних джерел енергії та вторинних енергоресурсів.

У **другому розділі „Характеристика насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур як об'єкт сушіння, експериментальні установки та методики досліджень”** проведено аналіз публікацій з визначенням фізико-механічних, хімічних, гігроскопічних і теплофізичних характеристик. Найменш дослідженні теплофізичні властивості насіння овочевих культур.

Розглянуті математичні моделі тепло- і масопереносу при сушінні капілярно-пористих матеріалів та методика математичного планування за ортогональним композиційним планом другого порядку при сушіння насіння зернових культур.

Надано опис експериментальних сушильних стендів (конвективний та теплонасосний), методики їх роботи та стандартна методика визначення якісних характеристик насіння. Розроблені стендові установки дозволяють дослідити



кінетику сушіння в автоматичному режимі збору та обробки інформації, з подальшою обробкою експериментальних даних на комп'ютерних програмах.

Програма автоматичного збору та обробки інформації дає безперервно дані про зміну маси та температури зразка в ході видалення вологи, а також може проводити розрахунки кінетики та динаміки сушіння в абсолютних та відносних координатах. Це дає змогу більш точно, оперативно та надійно одержувати та порівнювати кінетичні та швидкісні характеристики сушіння насіннєвих матеріалів.

У третьому розділі „Дослідження кінетики сушіння та якості насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур” представлені результати експериментальних досліджень кінетики сушіння насіння зернових, олійних, овочевих культур в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді.

Дослідження кінетики сушіння насіннєвого матеріалу проводилось в широкому діапазоні режимних параметрів, температура змінювалась в інтервалі 40 – 80°C, швидкість 0,5 – 3,5 м/с, вологовміст теплоносія 10 – 12 г/кг сухого повітря (рис. 1 - 3).

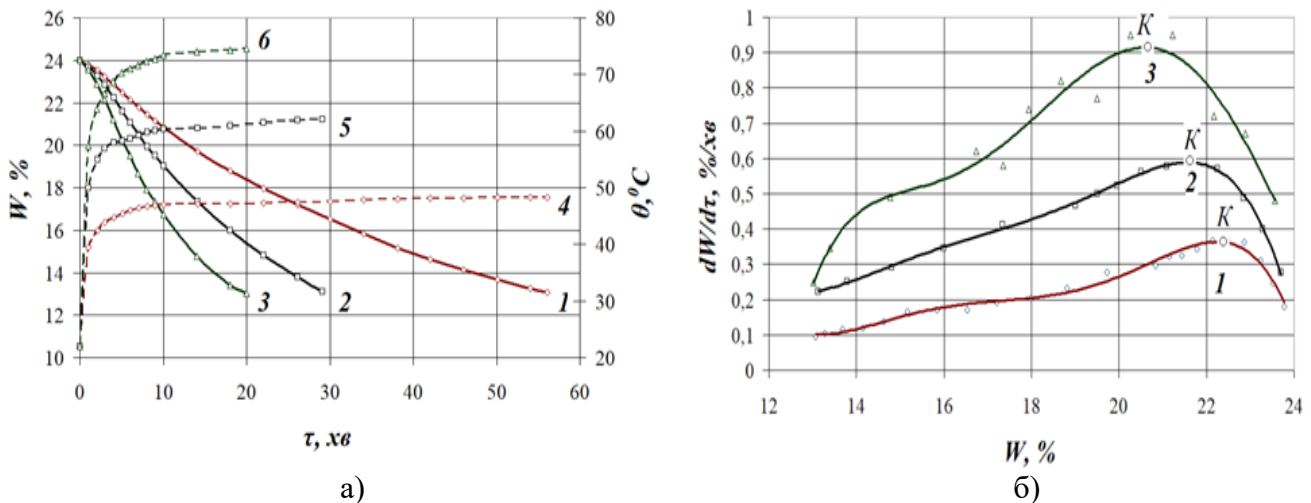


Рис. 1. Вплив температури теплоносія на тривалість (а) та швидкість сушіння (б) насіння пшениці:  $W_n = 24\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм:  
1,4 – 50°C, 2,5 – 65°C, 3,6 – 80°C

Криві сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур мають вигляд характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Найбільший вплив на кінетику процесу сушіння насіння пшениці має температура теплоносія, із підвищенням температури від 50 до 80°C тривалість сушіння зменшується в 2,85 раз. Активне прогрівання насіння пшениці відбувається на протязі 10 хв., потім сповільнюється і досягає свого кінцевого значення. Із наведених температурних кривих кінцева температура насіння при різних режимах сушіння становить при: 50°C – 48,6 °C; 65°C – 62,26 °C; 80°C – 74,62°C (рис. 1,а).

Процес сушіння в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді проходить в період падаючої швидкості сушіння, що характерно при дослідженні всіх видів насіннєвого матеріалу. Підвищення температури призводить до різкого збільшення швидкості сушіння з активним видаленням вологи з матеріалу (рис. 1,б).

Зменшення початкової вологості від 16 до 24% та збільшення швидкості руху теплоносія від 0,5 до 1,5 м/с при температурі теплоносія 50°C зменшує тривалість сушіння насіння пшениці відповідно в 3,5 та 1,33 рази (рис. 2,3).

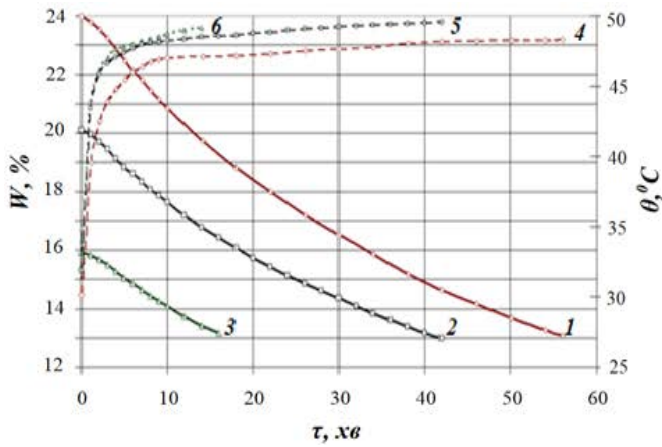


Рис. 2. Вплив початкової вологості насіння пшениці на тривалість та температуру нагрівання матеріалу:  
 $t = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $d = 10 \text{ г/кг с. п.}$ ,  
 $\delta = 2 \text{ мм}$ : 1,4 – 24%, 2,5 – 20%, 3,6 – 16%

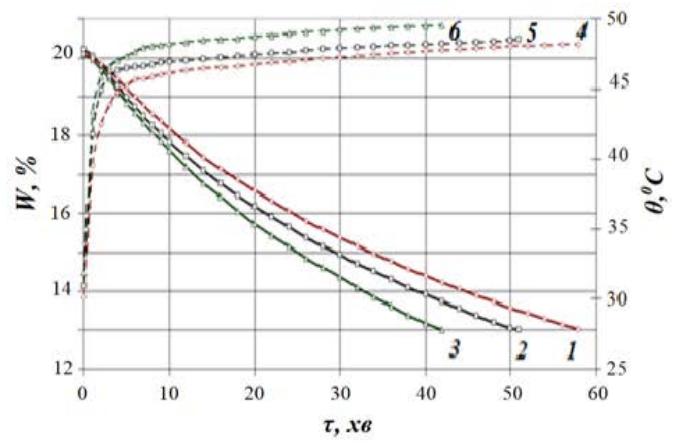


Рис. 3. Вплив швидкості руху теплоносія на тривалість та температуру нагрівання насіння пшениці:  $t = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  
 $d = 10 \text{ г/кг с. п.}$ ,  $\delta = 2 \text{ мм}$ :  
 1,4 – 0,5 м/с, 2,5 – 1,0 м/с, 3,6 – 1,5 м/с

Для обґрунтування режимів сушіння насіння пшениці в заданому температурному інтервалі проведені дослідження із визначення схожості, як фактору якості насінневого матеріалу.

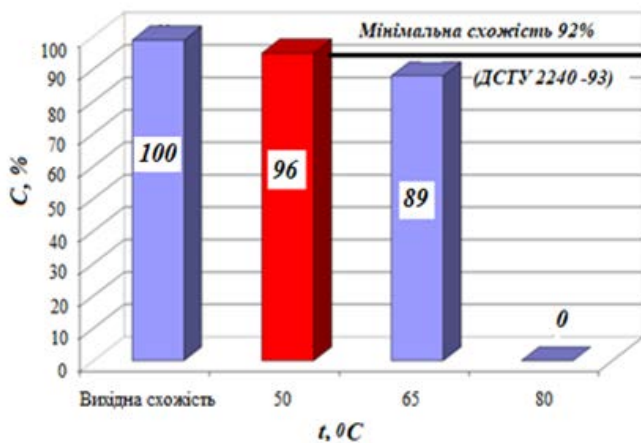


Рис. 4. Вплив температури теплоносія на схожість насіння пшениці на 7 день пророщування:  
 $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $W_n = 24\%$ ,  $d = 10 \text{ г/кг с. п}$

Найбільший вплив на якісні показники насіння відбувається від температури теплоносія. Результати досліджень показали, що найкраща схожість спостерігається при температурі теплоносія  $50^{\circ}\text{C}$  та нагрівання насіння пшениці до  $48,6^{\circ}\text{C}$  і складає 95%. При температурі теплоносія  $65^{\circ}\text{C}$  схожість менше за мінімальну схожість 92% встановленим ДСТУ 2240-93, а при нагріванні при  $80^{\circ}\text{C}$  втрачаються всі насінні властивості пшениці. (рис. 4).

Аналогічно проведені дослідження кінетики сушіння та схожості насіння

зернових культур вівса та ячменю від впливу температури та швидкості руху теплоносія, початкової вологості насіння, що подібні до характеристик насіння пшениці. Для насіння вівса та ячменю найкраща схожість спостерігається при температурі теплоносія  $50^{\circ}\text{C}$  і становить 95 – 96%.

Визначення трьохфакторного впливу (температура та швидкості руху теплоносія, початкової вологості матеріалу) на схожість, тривалість сушіння та температуру нагрівання насіння проведено згідно методики математичного методу планування багатфакторного експерименту.

При плануванні та обробці результатів експериментальних досліджень за ортогональним композиційним планом другого порядку отримано математичну модель процесу сушіння:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

де:  $x_1, x_2, x_3$  – кодовані значення факторів;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}$  – коефіцієнти рівняння регресії

На основі математичної моделі процесу сушіння насіння пшениці, вівса та ячменю розраховані рівняння регресії тривалості сушіння, схожість насіння та температура нагрівання насіння залежно від дії 3-х факторів (табл. 1).

Таблиця 1.

Рівняння регресії тривалості сушіння, температури нагрівання насіння та схожості насіння пшениці, вівса та ячменю

№	Назва рівняння	Назва насіння	Рівняння регресії
1.	Тривалість сушіння	Пшениця	$\tau_{II} = -18,81 + 0,0172t^2 - 3,2V^2 - 0,092W^2 - 1,833t - 22,36V + 12,161W + 0,264tV - 0,091tW + 0,25VW$
		Овес	$\tau_B = -48,09 - 4V^2 + 0,483t - 1,64V + 5,335W + 0,132tV - 0,05tW - 0,375VW$
		Ячмінь	$\tau_{Я} = -17,39 + 0,019t^2 + 6,88V^2 + 0,317W^2 + 0,086t - 24,3V + 6,928W + 0,132tV - 0,227tW - 0,25VW$
2.	Температура нагрівання насіння	Пшениця	$\theta_{II} = 15,94 + 12,83t - 5,98V - 0,543W + 0,355VW$
		Овес	$\theta_B = 24,18 + 0,004t^2 + 0,333t + 0,76V - 0,148W$
		Ячмінь	$\theta_{Я} = 8,19 + 0,85t - 0,68V - 0,12W$
3.	Схожість насіння	Пшениця	$C_{II} = -578,37 + 18,45t + 45,98V + 11,58W - 0,141t^2 - 22,56V^2 - 3,7W^2 + 0,17tV - 0,006tW - 0,006VW$
		Овес	$C_B = -617,92 + 16,91t + 67,11V + 15,32W - 0,112t^2 - 31,4V^2 - 4,07W^2 - 0,2tV - 0,017tW$
		Ячмінь	$C_{Я} = -612,8 - 0,127t^2 - 27,52V^2 - 0,51W^2 + 16,758t + 55,04V + 23,848W - 0,064tW$

За отриманими рівнянням регресії насіння зернових культур побудовані поверхні відгуків критеріїв оптимізації, які дозволяють наочно ілюструвати залежності значень тривалості сушіння, схожості та температури нагрівання насіння від параметрів сушіння (табл. 2).

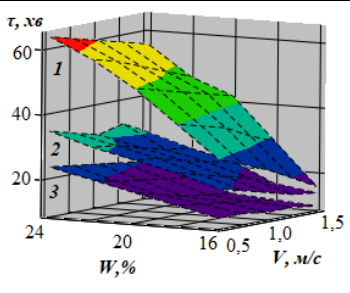
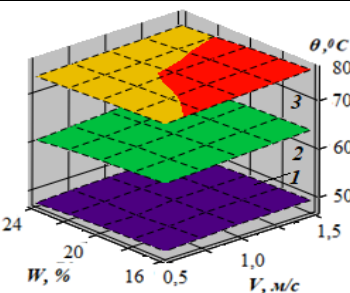
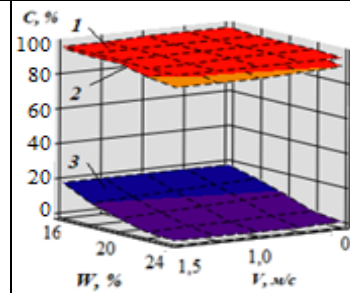
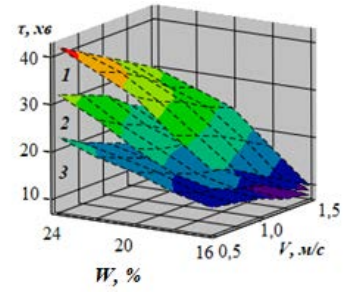
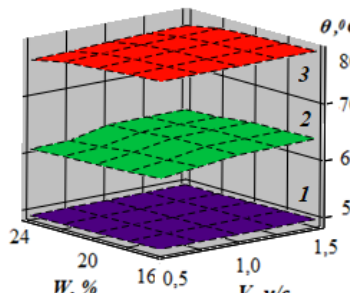
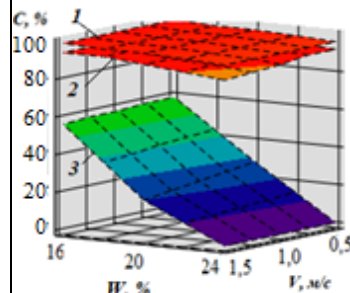
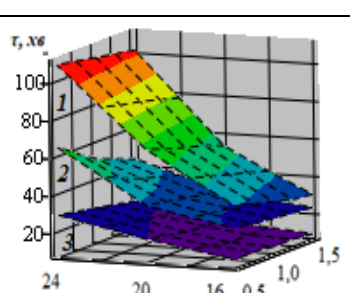
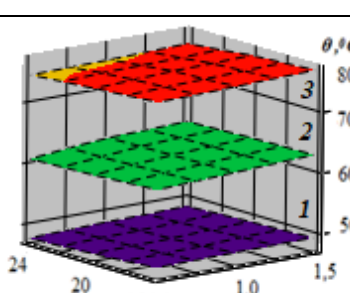
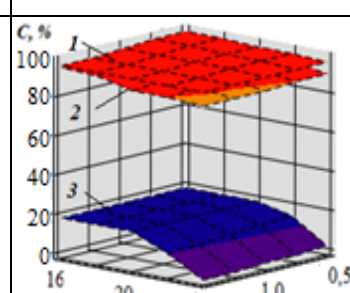
Отримані рівняння регресії та поверхні відгуку схожості від дії 3-х факторів вказують, що поверхні насіння пшениці, ячменю та вівса мають різний характер.

Вирішення проблеми підвищення якості насінневого матеріалу залежить від тривалості процесу та температури нагрівання насіння.

Тривалість сушіння насіння зернових культур залежить від дії всіх факторів, найбільше від температури теплоносія та початкової вологості матеріалу.

Таблиця 2.

Побудова поверхонь відгуку тривалості сушіння, температури нагрівання насіння та схожості зернових культур від трьохфакторного впливу

№	Назва насіння	Тривалість сушіння	Температура нагрівання насіння	Схожість насіння
1.	Пшениця сорт «Подольянка»			
2.	Овес сорт «Зоряний»			
3.	Ячмінь сорт «Барвістий»			
Позначення		1 – 50°C; 2 – 65°C; 3 – 80°C		

Найбільший вплив на схожість та температуру нагрівання насіння пшениці, ячменю та вівса відбувається від температури теплоносія.

Із представлених поверхонь відгуку для насіння пшениці, вівса та ячменю раціональним режимом сушіння є температура теплоносія 50°C, що дозволяє отримувати високу схожість матеріалу.

Вперше розроблена методика графічного визначення граничнодопустимої температури нагрівання насіння зернових культур виходячи із даних експериментальних досліджень кінетики процесу та якісних характеристик матеріалу. Цей метод дозволяє більш точно визначати граничнодопустиму температуру нагрівання матеріалу, так для насіння при початковій вологості 24% збільшення нагрівання відбувається на 12,1°C, замість рекомендованої авторами за даними літературних досліджень 42°C.

Побудований графік залежності схожості пшениці від температури нагрівання насіння з визначенням точки *M*, що відповідає мінімальній схожості насіння пшениці 92% та граничнодопустимій температурі нагрівання пшениці 54,1°C при температурі теплоносія 56,5°C. Визначено, що висока схожість насіння відбувається на ділянці *AC* до режиму сушіння 65°C (рис. 5).

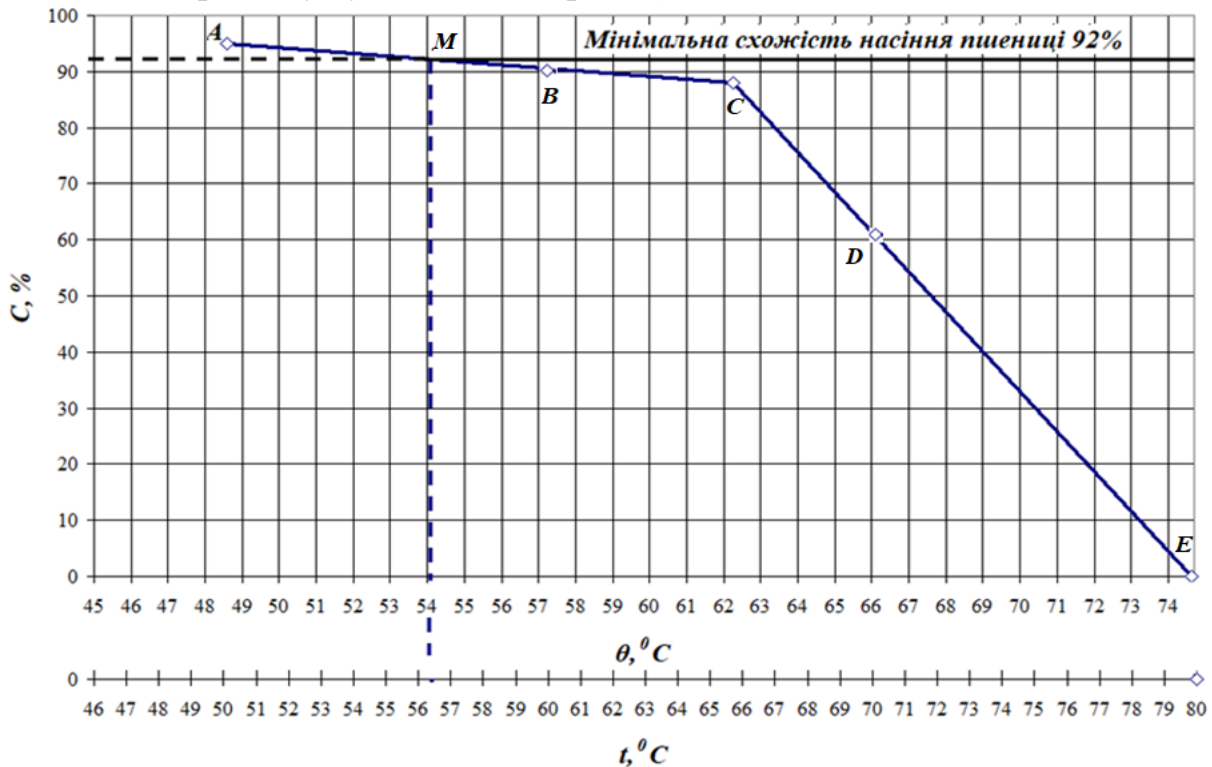


Рис. 5. Номограма визначення граничнодопустимої температури нагрівання насіння пшениці  $Wn = 24\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.:  
(точки *A, B, C, D, E* – експериментальні дані; точка *M* – графічно визначена граничнодопустима температура нагрівання насіння пшениці та температура теплоносія)

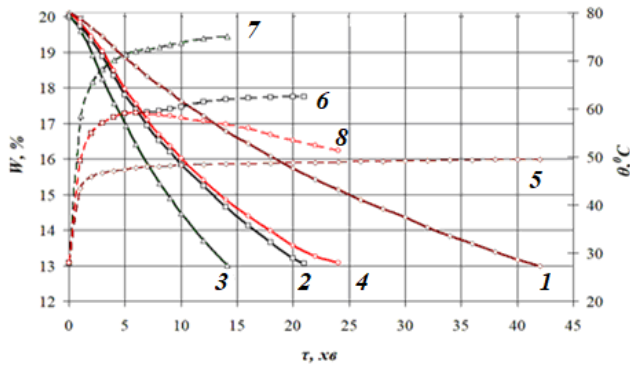
Граничнодопустима температура при сушінні насіння вівса становить 55,5°C, для насіння ячменю – 53,9°C.

Вперше для інтенсивності процесу сушіння насіння зернових культур короткочасно підвищували температуру теплоносія до 65°C під час прогрівання вологого матеріалу. В результаті проведених досліджень встановлено, що тривалість сушіння насіння пшениці в режимі 65/50°C при порівнянні з режимом 50°C зменшилось в 1,8 раз, а енергетичні витрати на 62% із схожістю матеріалу 100% (рис. 6).

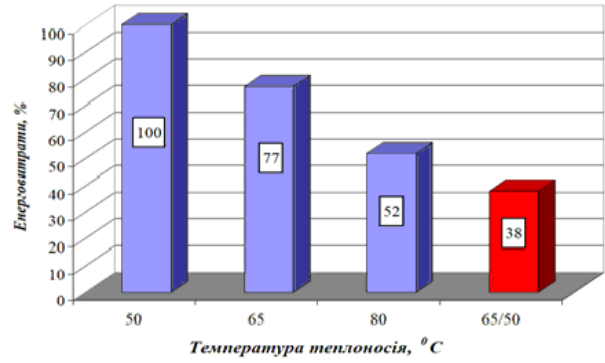
Вперше досліджено вплив ступеневих режимів сушіння на кінетику та схожість насіння ячменю, були вибрані режими сушіння 65/50, 80/відл/65 та 80/65°C. Найбільш раціональний є ступеневий режим з температурою теплоносія 65/50°C із схожістю насіння 99%, режим сушіння з відлежуванням 80/відл/65 становить 90%, при 80/65°C – 0%. Процес відлежування в ступеневому режимі 80/відл/65°C позитивно впливає на насінневі властивості матеріалу (рис. 7).

В результаті проведених досліджень були розроблені енергоефективні ступеневі режими сушіння насіння пшениці, ячменю та вівса, при яких схожість матеріалу склало 98 – 100% (рис. 8).

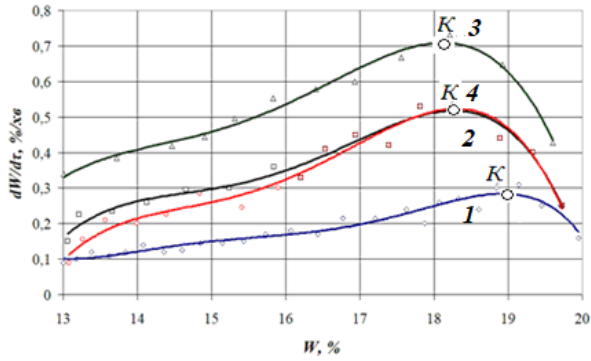




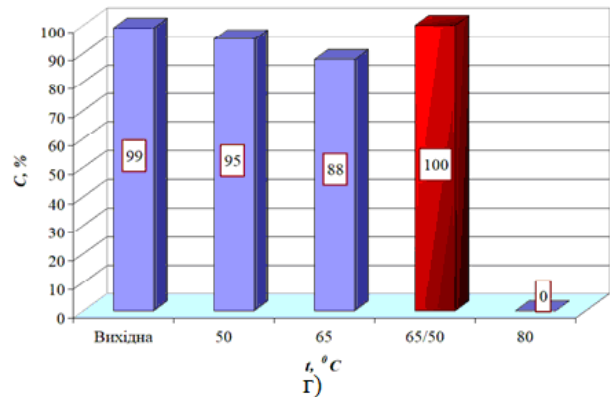
а)



б)

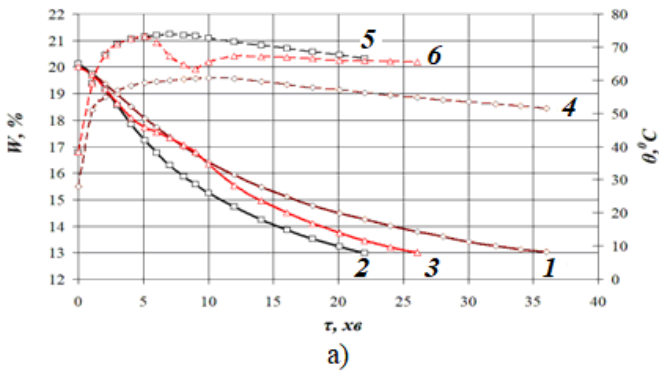


б)

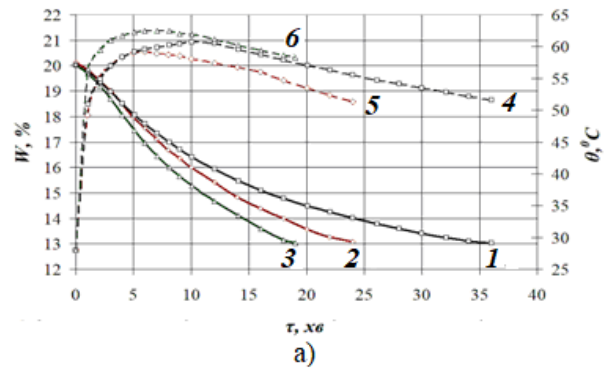


г)

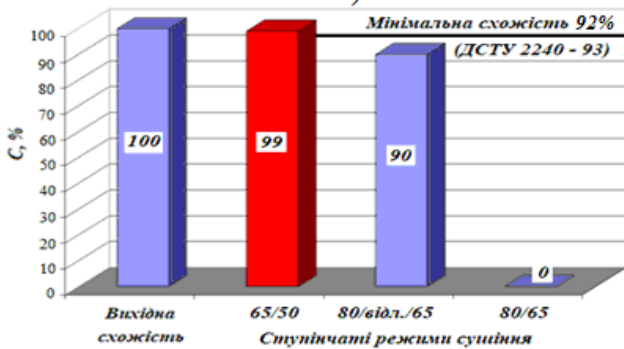
Рис. 6. Вплив ступеневих режимів сушіння на кінетику сушіння (а,б), енерговитрати (в) та схожість насіння пшениці (г)  $W_n = 20\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм: 1,5 – 50°C, 2,6 – 65°C, 3,7 – 80°C, 4,8 – 65/50°C



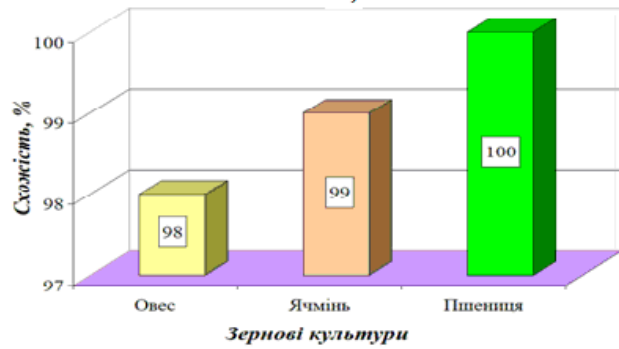
а)



а)



б)



б)

Рис. 7. Вплив ступеневих режимів сушіння на тривалість сушіння та схожість насіння ячменю:  $W_n = 20\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм: 1,4 – 65/50°C; 2,6 – 80/65°C; 3,6 – 80/ відл. /65 °C

Рис. 8. Вплив ступеневого режиму сушіння на тривалість сушіння та схожість насіння зернових культур  $t = 65/50^\circ\text{C}$ ,  $W_n = 20\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм: 1,4 – ячмінь, 2,5 - пшениця, 3,6 – овес

Розроблені ступеневі режими для сушіння сої 60/50°C, для насіння гарбузу та цукрового буряку 60/40°C, що дають високу схожість насіння (табл. 3).

Таблиця 3.

Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння та схожість насіння олійних, овочевих та технічних культур

№	Назва насіння	Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння	Вплив температури теплоносія на схожість насіння
1.	Соя сорт «Княжна»		
	Позначення	$W_n = 22\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм. 1,5 – 40°C, 2,4 – 50°C, 3,7 – 60°C, 4,8 – 60/50°C	$W_n = 22\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.
2.	Гарбуз сорт «Стофунтовий»		
	Позначення	$W_n = 38\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм. 1,5 – 40°C, 2,6 – 50°C, 3,7 – 60°C, 4,8 – 60/40°C.	$W_n = 38\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.
3.	Цукровий буряк сорт «Рамзес»		
	Позначення	$W_n = 24\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм. 1 – 40°C, 2 – 50°C, 3 – 60/40°C, 4 – 60°C	$W_n = 24\%$ , $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.

Встановлено, що сушіння насіння сої в ступеневому режимі 60/50°C збільшує інтенсивність в 1,7 разів в порівнянні із режимом 50°C та схожість до 99%.

Сушіння насіння гарбуза при температурі 40°C довготривале і енерговитратне, тому був розроблений ступеневий режим сушіння 60/40°C, що забезпечує високу схожість насіння гарбуза на рівні 98% і зменшує тривалість в 3,4 рази. На рис. 9 показано фотографії схожості насіння гарбуза в режимі 40, 60°C та 60/40°C.

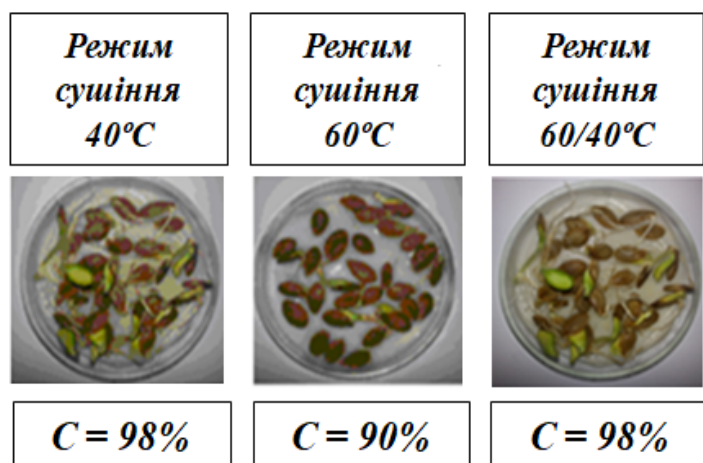


Рис. 9. Вплив режиму сушіння на схожість насіння гарбуза на 10 день пророщування:  
 $W_n = 38\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с.п.

Вперше визначено, що для сушіння насіння цукрового буряку необхідно застосовувати ступеневий режим сушіння 60/40°C, що дозволяє суттєво збільшити схожість до 90%, так як низькотемпературний режим сушіння 40°C не забезпечує необхідну схожість матеріалу.

Для сушіння насіння ріпаку, томату та перцю не використовуємо ступеневі режими сушіння, так як при температурі теплоносія 50°C зберігається висока схожість насіння на рівні 97 – 98%.

Експериментальні дослідження із сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур на конвективному стенді проводилось від дії трьох факторів, які широко використовуються в існуючих зерносушарках: від впливу температури та швидкості руху теплоносія, початкової вологості матеріалу, але ще є важливий параметр це вологовміст теплоносія.

Вперше проведені дослідження впливу вологовмісту теплоносія на кінетику процесу сушіння насіння зернових та олійних культур, і як видно з рис. 10, навіть зміна вологовмісту теплоносія на 2 г/кг дає інтенсифікацію процесу на 12 – 19%.

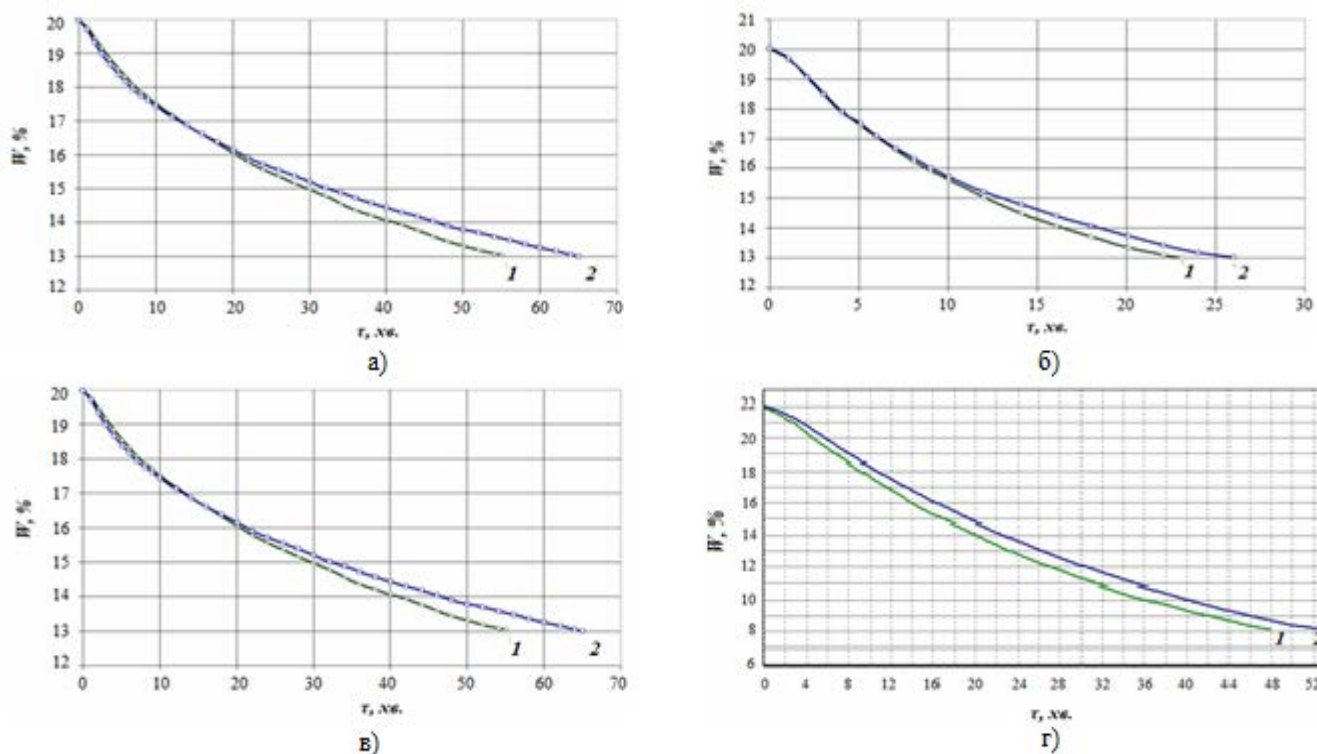


Рис. 10. Вплив вологовмісту теплоносія на тривалість сушіння насіння пшениці (а), ячменю (б), вівса (в), ріпаку (г):  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $\delta = 2$  мм: 1 – 10 г/кг с.п.; 2 – 12 г/кг с.п.



В четвертому розділі „Дослідження кінетики сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур на сушильних стендах із тепловим насосом”. Для дослідження впливу вологовмісту теплоносія на кінетику та якість насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур були розроблені сушильні стенди шахтного та камерного типу із тепловим насосом.

Сушильний стенд шахтного типу з тепловим насосом (рис. 11) складається із теплового насоса з вентилятором 1, автотрансформатора 3 для регулювання температури в зерносушильній шахті, блока нагрівачів 4 та приладів для заміру витрат електроенергії 5, зміни маси 7 та температури нагрівання насіння (на рисунку не вказано) під час сушіння.

На рис. 12 представлений процес сушіння насіння зернових культур в сушильному стенді шахтного типу з тепловим насосом при температурі теплоносія  $50^{\circ}\text{C}$ , швидкості руху  $1,5\text{ м/с}$  із зниженим вологовмістом теплоносія до  $6\text{ г/кг с.п.}$  при товщині шару насіння  $20\text{ мм}$ .

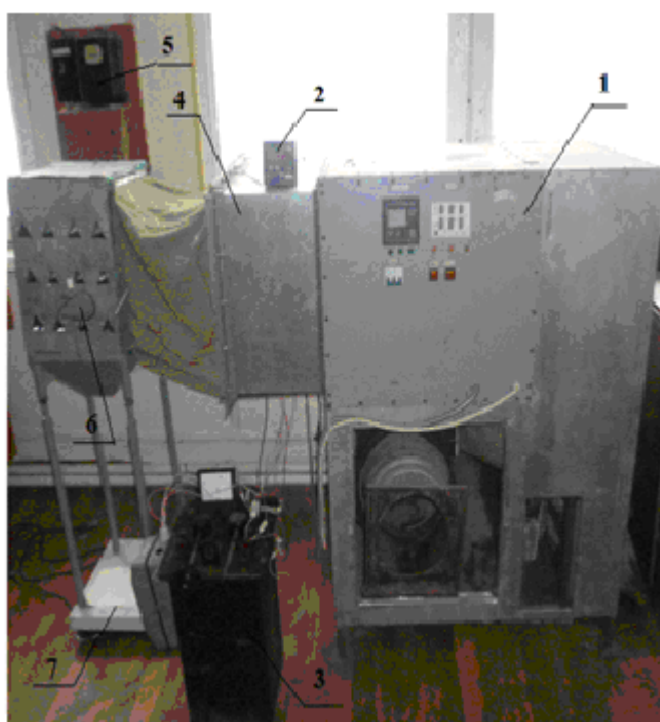


Рис. 11. Сушильний стенд шахтного типу з тепловим насосом для сушіння насіння зернових та олійних культур:  
1 – тепловий насос з вентилятором;  
2 – терморегулятор;  
3 – автотрансформатор; 4 – блок нагрівачів;  
5 – лічильник електроенергії;  
6 – зерносушильна шахта; 7 – терези.

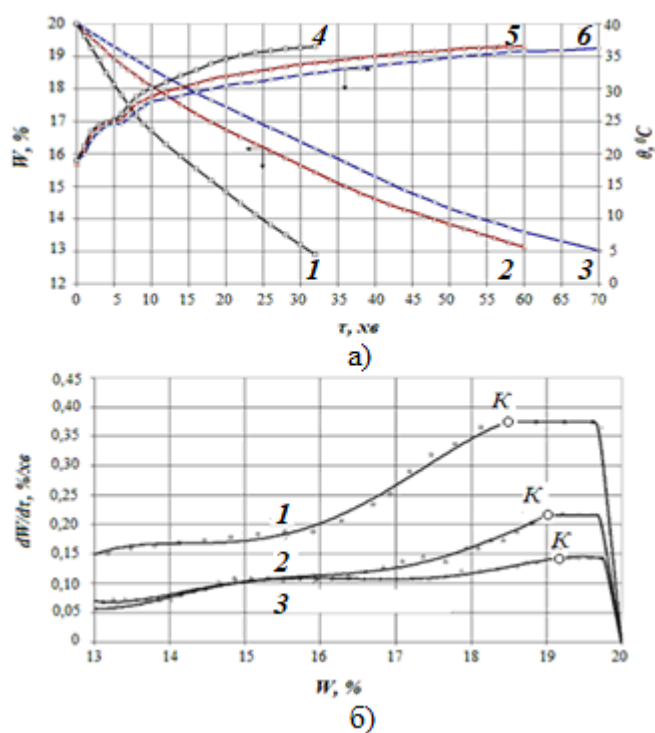


Рис. 12. Вплив температури теплоносія на тривалість (а) та швидкість сушіння (б) насіння вівса, пшениці та ячменю:  
 $W_n = 20\%$ ,  $t = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 1,5\text{ м/с}$ ,  
 $\delta = 20\text{ мм}$ ,  $d = 6\text{ г/кг с. п.}$  :  
1,4 – овес; 2,5 – пшениця; 3,6 – ячмінь

Тривалість сушіння від виду та властивостей зернового матеріалу змінюється, так насіння вівса сушиться швидше ніж насіння пшениці та ячменю в  $1,8 - 2,1$  раз (рис.12,а).

Процес сушіння насіння зернових культур проходить в періодах постійної та падаючої швидкості сушіння (рис. 12,б), що відрізняється від процесу сушіння насіння на конвективному стенді, де не спостерігається період постійної швидкості сушіння (рис. 1,б).

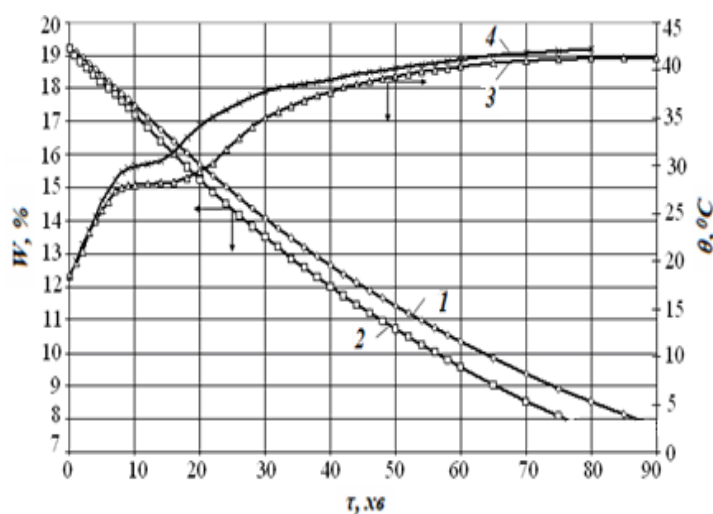


Рис. 13. Вплив вологовмісту теплоносія на тривалість сушіння насіння ріпаку:  
 $Wn = 19,2\%$ ,  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $\delta = 40 \text{ мм}$   
 1,3 – електронагрів ( $d = 10 \text{ г/кг с. п.}$ ),  
 2,4 – тепловий насос ( $d = 6 \text{ г/кг с. п.}$ )

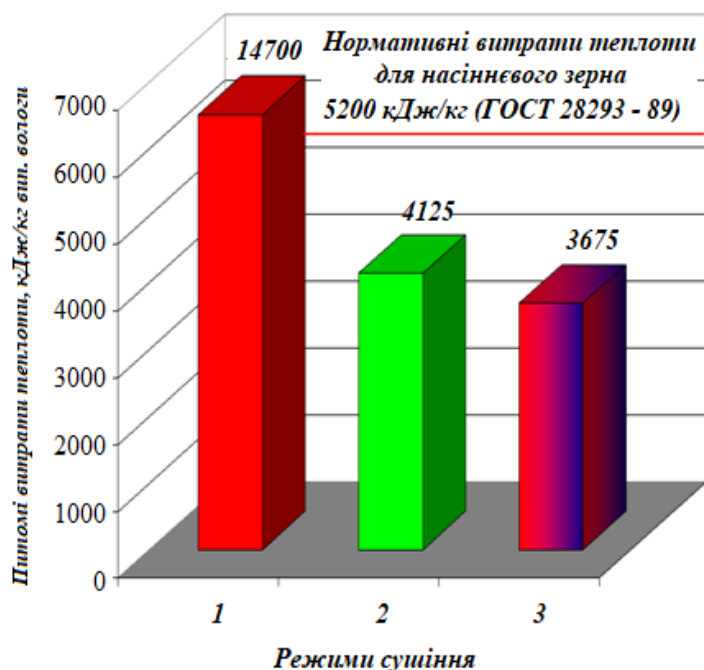


Рис. 14. Питомі витрати теплоти від режиму сушіння ріпаку та способу підготовки теплоносія:  
 з електронагрівом:  
 1 –  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $\delta = 40 \text{ мм}$ ,  $d = 10 \text{ г/кг с. п.}$   
 в тепловому насосі:  
 2 –  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $\delta = 40 \text{ мм}$ ,  $d = 6 \text{ г/кг с. п.}$   
 3 –  $t = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,2 \text{ м/с}$ ,  $\delta = 20 \text{ мм}$ ,  $d = 6 \text{ г/кг с. п.}$

Проведені дослідження впливу вологовмісту теплоносія на тривалість сушіння насіння ріпаку (рис. 13) та визначені питомі витрати теплоти від нагрівання теплоносія від електронагрівачів та теплового насосу (рис. 14).

Зміна вологовмісту теплоносія від 10 до 6 г/кг с. п. в сушильному стенді шахтного типу із тепловим насосом при сушінні насіння ріпаку зменшує тривалість на 13%.

Питомі витрати теплоти при використанні теплового насосу складають 3675 – 4125 кДж/кг вип. вологи, що в 3,5 – 4 рази менше, ніж при сушінні від електронагрівачів і менше на 26 – 40% від нормативних витрат для насінневого зерна 5200 кДж/кг вип. вологи за ГОСТ 28293 - 89 .

Схожість насіння пшениці, вівса, ячменю та ріпаку в сушильному стенді шахтного типу з тепловим насосом складає 99 - 100%.

Не можна сушити насіння всіх культур на одному стенді з шахтною сушильною камерою.

Для сушіння насіння овочевих та олійних культур з великою зернівкою був розроблений сушильний стенд камерного типу із тепловим насосом (рис. 15).

Сушильний стенд камерного типу складається із теплонасосного теплогенератора 1, блоку електронагрівачів 2 та сушильної камери 3 із встановленими сітчастими піддонами.



Рис. 15. Сушильний стенд камерного типу з тепловим насосом для сушіння насіння олійних та овочевих культур:  
1 – теплонасосний агрегат; 2 – електронагрівачі;  
3 – сушильна камера з піддонами.

Сушіння насіння сої сорту «Княжна» проводили в рекомендованому ступеневому режимі 60/50°C із зниженим вологовмістом теплоносія до 6 г/кг с.п. При сушінні насіння сої при температурі теплоносія 60°C матеріал прогрівається до температури 53,4°C на протязі 60 хв, потім проводимо зниження температури теплоносія до 50°C (рис. 16).

Процес сушіння насіння сої проходить в період постійної та падаючої швидкості сушіння. При різкому зниженні температури теплоносія від 60 до 50°C швидкість сушіння знижується на 0,32%/хв. (рис. 17).

Проведені дослідження якісних характеристик насіння сої в режимі сушіння 60/50°C показали високу схожість матеріалу на рівні 100%.

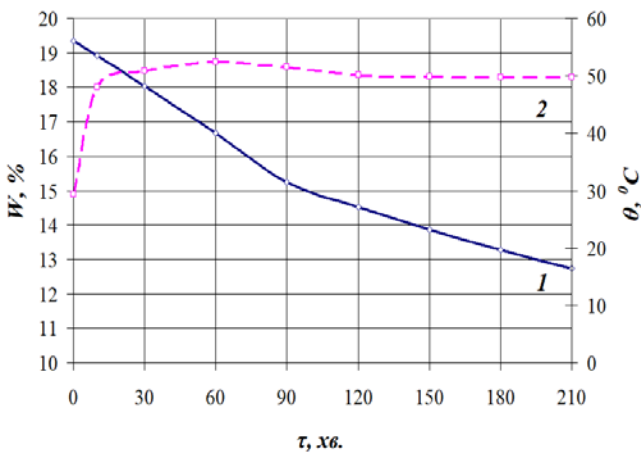


Рис.16. Вплив температури теплоносія та температури нагрівання матеріалу на тривалість сушіння насіння сої  
 $t = 60/50^\circ\text{C}$ ,  $W_n = 19,4\%$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  
 $d = 6 \text{ г/кг с. п.}$ ,  $\delta = 2 \text{ мм}$ :  
1 – крива сушіння; 2 – температурна крива

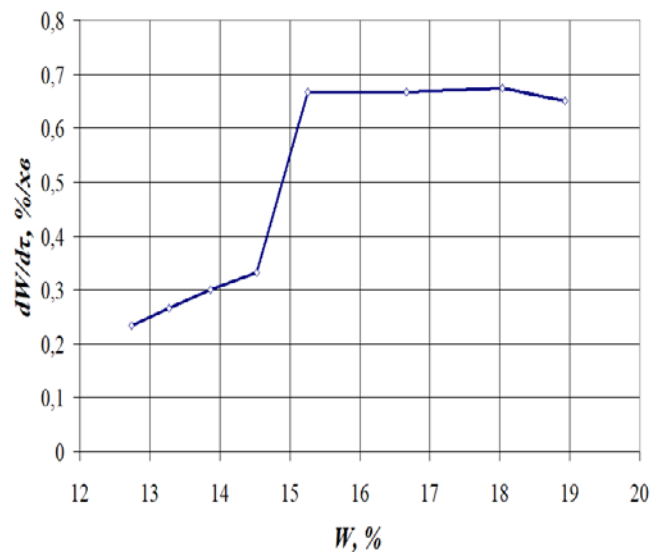


Рис. 17. Зміна швидкості сушіння в ступеневому режимі сушіння 60/50°C від вологості насіння сої  
 $W_n = 19,4\%$ ,  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ,  $d = 6 \text{ г/кг с. п.}$

Вперше проведені дослідження із сушіння насіння гарбуза на сушильному стенді з тепловим насосом в ступеневому режимі 60/40°C, внаслідок чого збільшується інтенсивність процесу на 37%, питомі витрати теплоти зменшуються на 40% в порівнянні з режимом 40°C (рис. 18, 19).

При сушінні насіння гарбуза відбувається прогрів матеріалу, потім настає період падаючої швидкості сушіння з руйнуванням покривної плівки (рис. 20).

Зниження температури в ступеновому режимі сушіння 60/40°C характеризується від'ємним значенням Ребіндера (рис. 21).

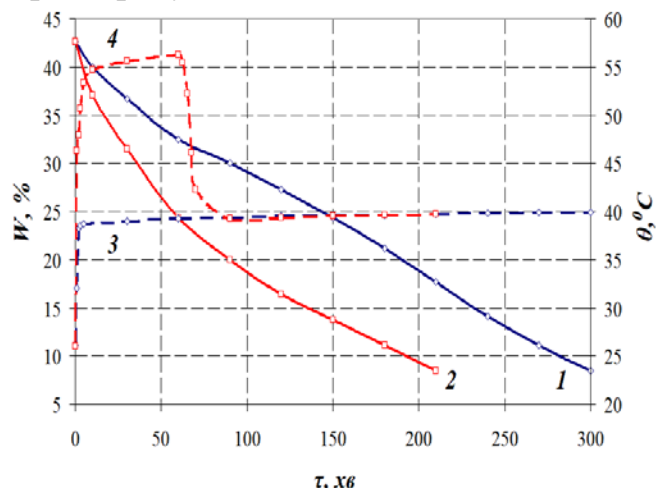


Рис. 18. Вплив температури теплоносія та температури нагрівання матеріалу на тривалість сушіння насіння гарбуза  $W_n = 42,6\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 6$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм: 1,3 – 40°C; 2,4 – 60/40°C

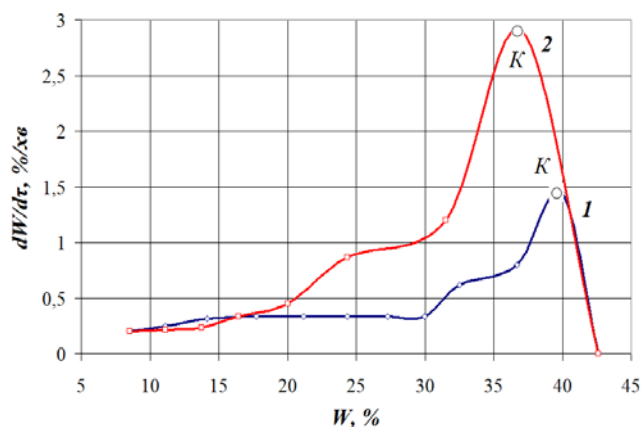


Рис. 20. Зміна швидкості сушіння від вологості насіння гарбуза  $W_n = 42,6\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 6$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм: 1 – 40°C, 2 – 60/40°C

Схожість насіння гарбуза в сушильному стенді з тепловим насосом складає 100% для сортів «Лікувальний» та «Стофунтовий». Проведено порівняння теплонасосного способу сушіння та традиційного вказує на переваги першого способу в інтенсивності на 2 - 3 дні та збільшення кількості пророщуваного насіння на 2%.

В п'ятому розділі „Дослідження тепломасообміну при зневодненні насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур” представлені методи дослідження тепломасообміну при сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

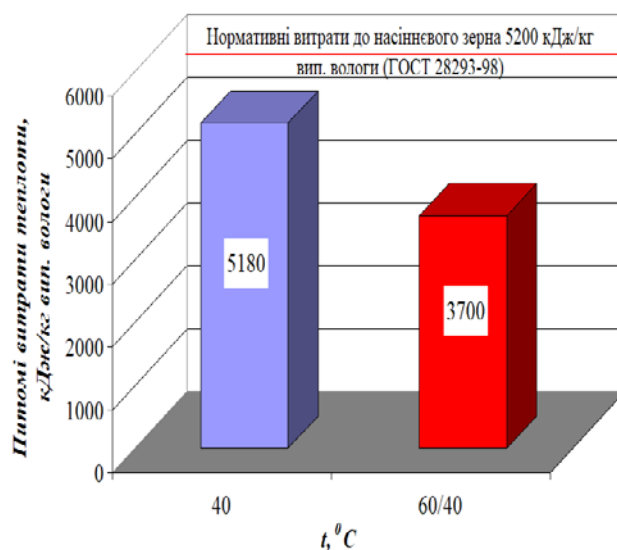


Рис. 19. Середні питомі витрати теплоти від режиму сушіння насіння гарбуза

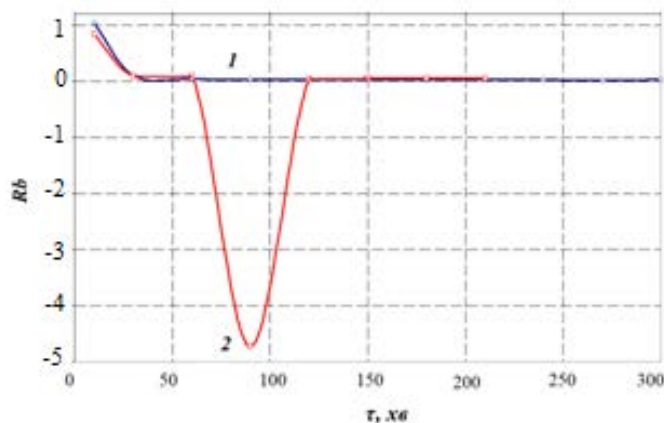


Рис. 21. Зміна критерію Ребіндера від тривалості сушіння насіння гарбуза  $W_n = 42,6\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 6$  г/кг с. п.: 1 – 40°C, 2 – 60/40°C

Дослідження кінетики сушіння проводили через узагальнення характеру протікання процесу на насінні із кожної групи: зернові – пшениця, олійні – соя, овочеві – гарбуз, технічні – ріпак.

Оперування узагальненим часом сушіння надає дослідженню процесу сушіння узагальнюючий характер. Одне і те ж значення може бути отримано внаслідок великої кількості різних комбінацій  $N$  і  $\tau$ , тобто фіксованому значенню  $N\tau$  відповідає не одна визначена сукупність першочергових величин, а велика кількість подібних сукупностей. Відповідно, при дослідженні процесу сушіння з використанням  $N\tau$  аналізується не єдиний частковий випадок, а велика кількість різних випадків сушіння, об'єднаною деякою узагальненістю параметрів процесів.

В математичній формі запису ці залежності представлені наступним виразом:

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \dots = N_n\tau_n = (N\tau)_W = const \quad (2)$$

де:  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – швидкість сушіння в перший період (при відсутності першого періоду – максимальна швидкість сушіння) при різних режимах;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  – проміжний час сушіння, на протязі якого вологість змінюється від початкової вологості  $W_n$  до вологості  $W$ .

Змінна  $N\tau$  є стійким комплексом величин, характерних для процесу сушіння, тому у відповідності з основами теорії подібності і аналізу розмірності величини  $N\tau$  назвали узагальненою змінною або узагальненим часом сушіння.

В частковому випадку для першого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W \quad (3)$$

В загальному випадку для другого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W + W_x = const \quad (4)$$

де:  $W_x$  – величина, яка залежить від властивостей матеріалу, визначається з експерименту.

Швидкість сушіння в кожній частині другого періоду являє собою лінійну функцію вологості, тобто, дійсна крива швидкості сушіння в другому періоді замінюється ломаною прямою.

Використовуємо для розгляду, так звану відносну швидкість сушіння, яка визначається виразом:

$$N^* = \left| \frac{dW}{d\tau} \right| \div N = \frac{1}{N} \left| \frac{dW}{d\tau} \right| \quad (5)$$

Величина відносної швидкості сушіння при даному  $W$ , яка знаходиться з узагальненої кривої сушіння  $W - N\tau$ , чисельно рівна тангенсу кута нахилу кривої точки  $W$  до вісі  $N\tau$ , тобто  $N^*$  знаходиться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = tg(W, N\tau) = f(W) \quad (6)$$

Величина  $N^*$  не залежить від режиму сушіння і для конкретного матеріалу при даному методі сушіння є лише функцією вологості.

Провівши графічне диференціювання всього лише однієї узагальненої кривої кінетики сушіння, можна отримати криву  $N^* - W$ , яка носить назву узагальненої кривої швидкості сушіння.



При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні насінневого матеріалу на конвективному стенді в елементарному шарі процес проходить в другому періоді сушіння і обов'язково повинно враховувати величини емпіричних коефіцієнтів, обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти визначаються безпосередньо, з досліду із сушіння даного матеріалу.

Другий період сушіння починається при всіх режимах в  $W_{K_1}$  і часу  $\tau$ , рівного тривалості першого періоду сушіння.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_1} - W_p) - K_1 \tau_1 \quad (7)$$

$$W_{K_1} \geq W \geq W_{K_2}$$

де  $K_1$  – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду;

$\tau_1$  – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_2} - W_p) - K_2 \tau_2 \quad (8)$$

$$W_{K_2} \geq W \geq W_{K_3}$$

де  $K_2$  – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду;

$\tau_2$  – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_3} - W_p) - K_3 \tau_3 \quad (9)$$

$$W_{K_3} \geq W \geq W_K$$

де  $K_3$  – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду;

$\tau$  – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

Величина  $W_p$  являє собою рівноважну вологість матеріалу. Величина  $W_K$  визначає кінцеву вологість висушуваного матеріалу.

При побудові узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння в напівлогарифмічній системі координат для насіння пшениці, сої, ріпаку спостерігаємо дві частини другого періоду, для насіння гарбуза – три (рис. 22).

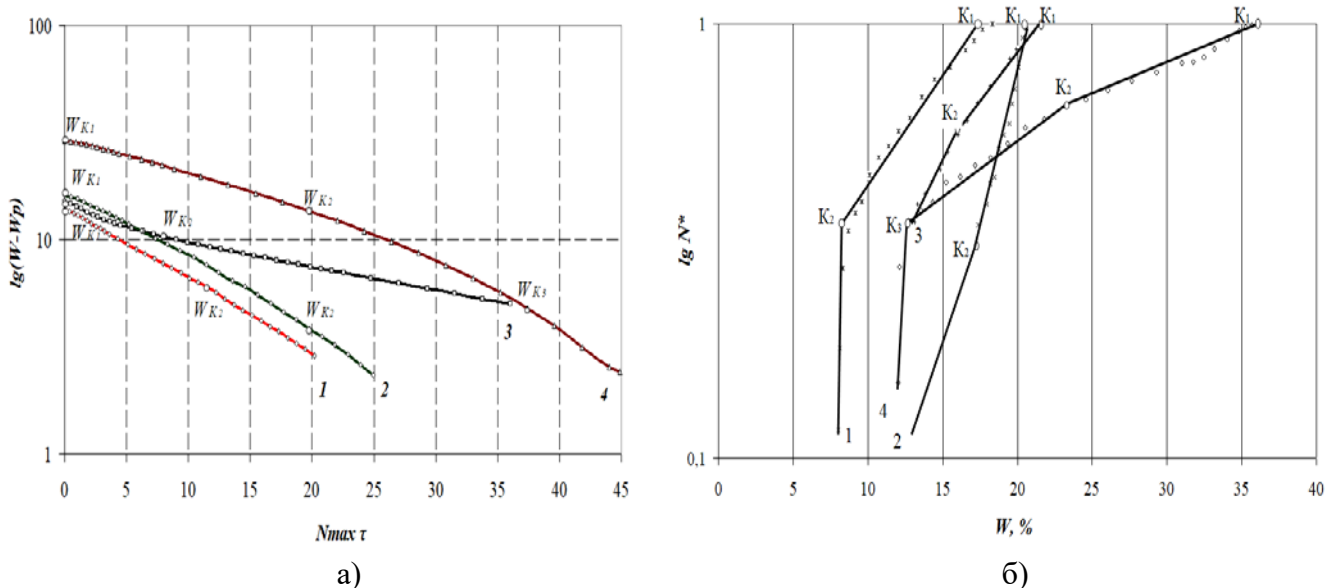


Рис. 22. Узагальнені криві сушіння (а) та швидкості сушіння (б) насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку в напівлогарифмічній системі координат в другому періоді сушіння:  
1 – пшениця; 2 – ріпак; 3 – соя; 4 – гарбуз.

З рис. 22,6 видно, що узагальнені швидкості сушіння показані в напівлогарифмічних координатах, представляють собою ламані лінії, які складаються з прямих. Закон зміни при переході від однієї частини до другої частини змінюється, що вказує на відмінність в кінетиці та динаміці сушіння в різних частинах процесу сушіння.

Розраховані коефіцієнти сушіння та відносні коефіцієнти сушіння, а також формули для визначення узагальненої швидкості сушіння (табл. 4).

Таблиця 4.

Значення коефіцієнтів та узагальненої швидкості сушіння при сушінні насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку в другому періоді сушіння

№	Назва насіння	Діапазон критичної вологості, %	Відносний коефіцієнт сушіння			Коефіцієнт сушіння			Значення узагальненої швидкості сушіння
			$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	
1.	Пшениця	21,61 – 15,35	0,0157	-	-	0,010	-	-	$N^* = 0,1017e^{0,1072W}$
		15,35 – 13,12		0,012	-	-	0,0076	-	$N^* = 0,05e^{0,1508W}$
2.	Соя	20,94 – 17,38	0,012	-	-	0,006	-	-	$N^* = 0,0011e^{0,0352W}$
		17,38 – 12,02	-	0,0052	-	-	0,0017	-	$N^* = 0,0087e^{0,2099W}$
3.	Гарбуз	36,15 – 23,17	0,0262	-	-	0,0117	-	-	$N^* = 0,2858e^{0,0342W}$
		23,17 – 14,38	-	0,028	-	-	0,0125	-	$N^* = 0,179e^{0,0558W}$
4.	Ріпак	14,38 – 12,02	-	-	0,0222	-	-	0,0099	$N^* = 0,0059e^{0,3011W}$
		18,32 – 9,14	0,02	-	-	0,013	-	-	$N^* = 0,1424e^{0,1103W}$

Загальна тривалість сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур при сушінні в другому періоді:

$$\tau_{роз} = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1} - W_p}{W_{K_2} - W_p} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2} - W_p}{W_{K_3} - W_p} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3} - W_p}{W_{K_4} - W_p} \right) \quad (10)$$

Розраховано тривалість сушіння насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку за формулою 10. Отримані формули тривалості сушіння для різних насінневих матеріалів має різні коефіцієнти і різні узагальнені швидкості сушіння, що визначені із розрахунку (табл. 5).

Таблиця 5.

Тривалість процесу сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур

№ п/п	Назва насіння	Розрахункова тривалість процесу сушіння, хв.
1.	Пшениця	$\tau_{п} = \frac{19,65}{N}$
2.	Соя	$\tau_{с} = \frac{39,22}{N}$
3.	Гарбуз	$\tau_{г} = \frac{43,07}{N}$
4.	Ріпак	$\tau_{р} = \frac{23,58}{N}$

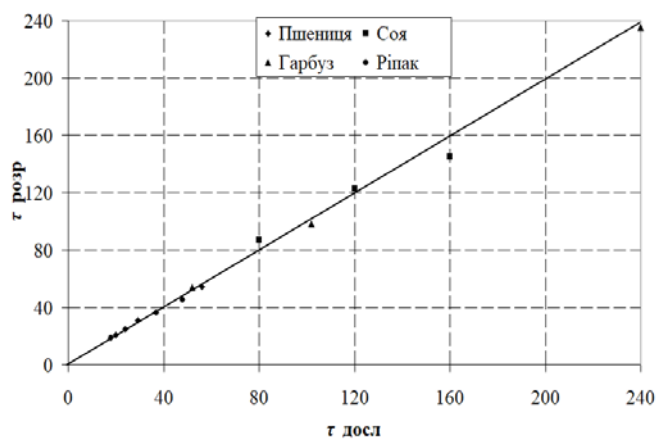


Рис. 23. Співставлення дослідної та розрахункової тривалості сушіння насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку

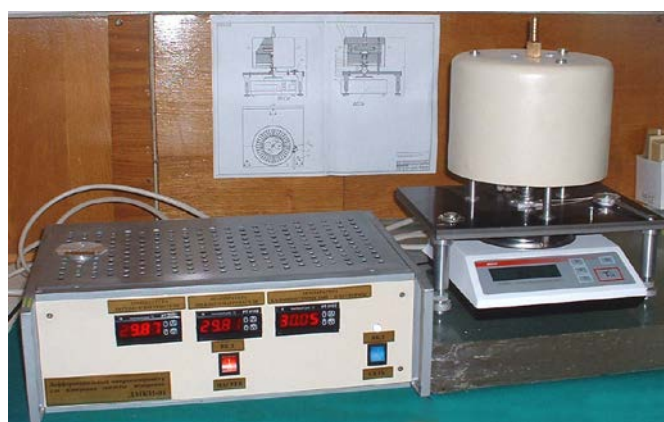


Рис. 24. Зовнішній вигляд диференційного мікрокалориметра ДМК1-01:

- 1 – електронний блок; 2 – платформа;
- 3 – аналітичні ваги; 4 – кожух теплового блоку; 5 – тепловий блок

При порівнянні дослідної та розрахункової тривалості сушіння насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку відхилення значень не перевищує 3% (рис. 23).

Для визначення питомої теплоти випаровування функціональної сировини вперше використовується диференційний мікрокалориметр ДМК1-01, розроблений у відділі теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України (рис. 24).

На диференційному мікрокалориметрі ДМК1-01 досліджували теплоємність та теплоту випаровування насіння гарбуза та теплоємність сої (рис. 25 - 27).

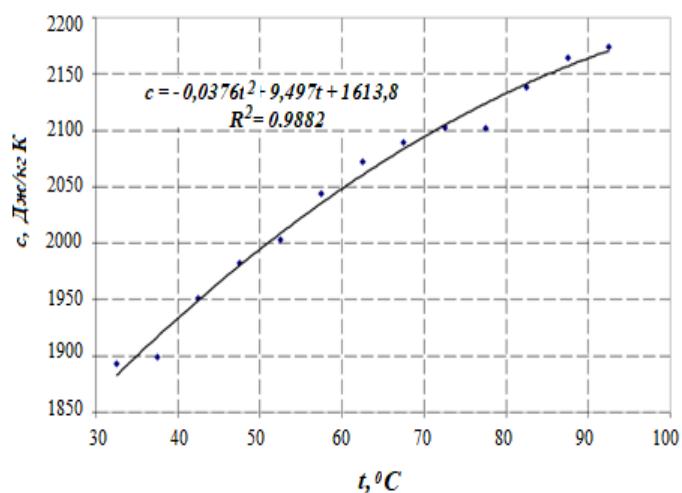


Рис. 25. Залежність теплоємності насіння сої від впливу температури теплоносія

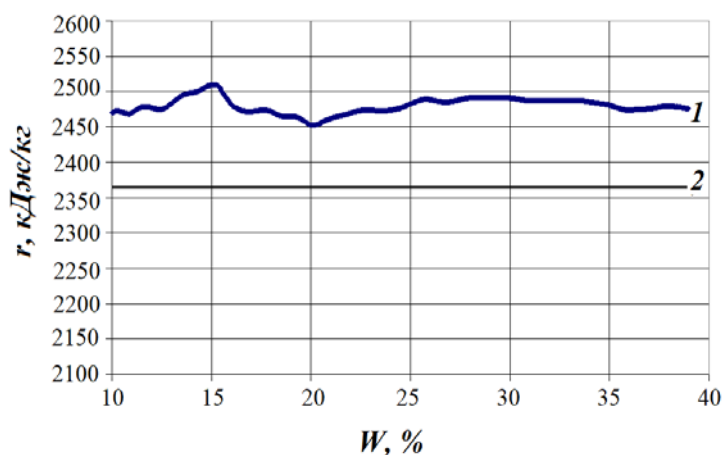


Рис. 26. Зміна теплоти випаровування від вологості насіння гарбуза  
 $t = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 0,8 \text{ см/с}$ :  
 1 – зразок насіння гарбуза;  
 2 – довідкове значення дистильованої води.

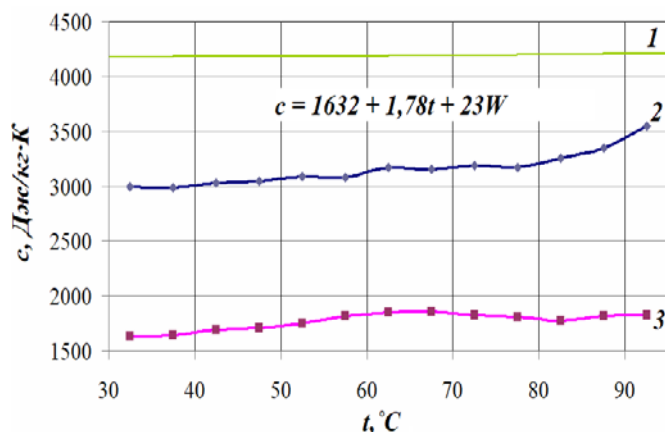


Рис. 27. Залежність теплоємності насіння гарбуза від впливу температури теплоносія:  
 1 – довідкове значення дистильованої води;  
 2 – зразок насіння гарбуза з вологістю 60%;  
 3 – зразок насіння з абсолютно сухою масою



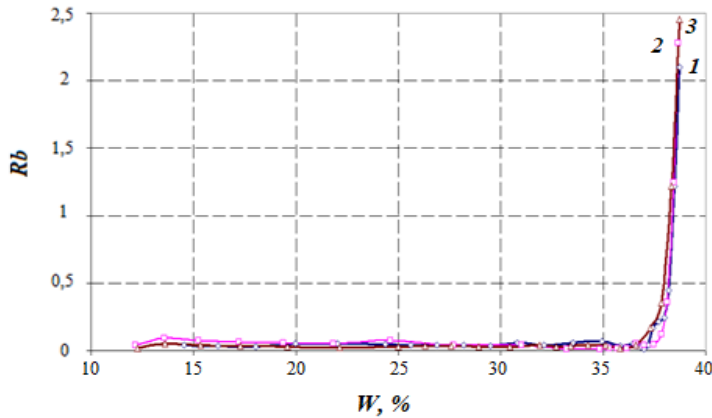


Рис. 28. Зміна критерію Ребіндера від вологості насіння гарбуза:  
1 – 40°C, 2 – 50°C, 3 – 60°C

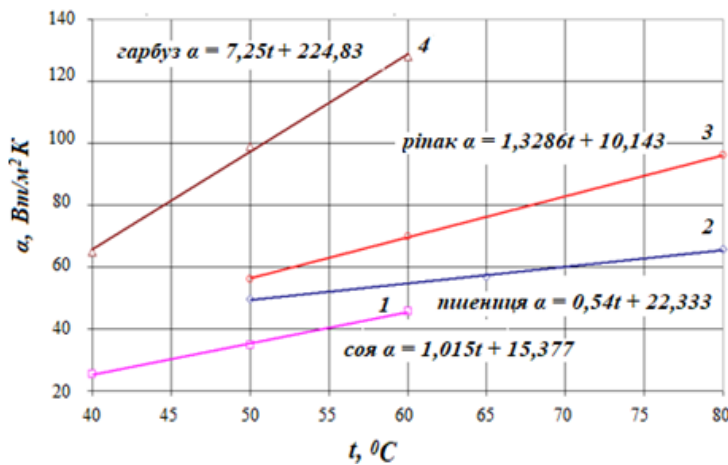


Рис. 29. Зміна коефіцієнту теплопередачі від режиму сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур:

1 – соя, 2 – пшениця, 3 – ріпак, 4 – гарбуз.

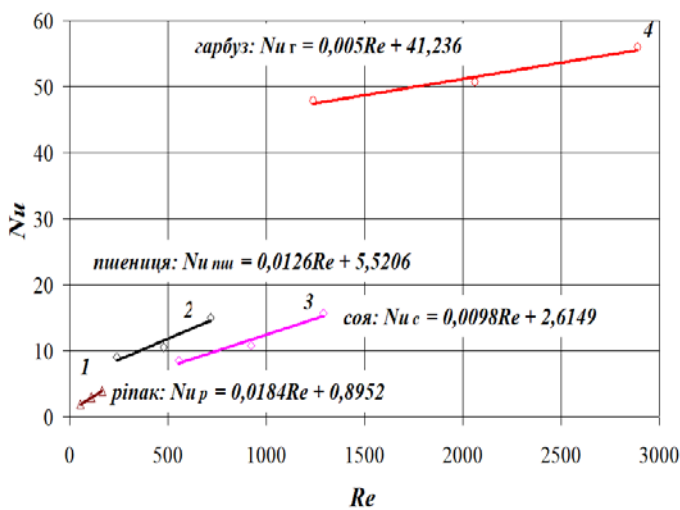


Рис. 30. Зміна критерію Нусельта ( $Nu$ ) від критерію Рейнольдса ( $Re$ ):  
1 – ріпак; 2 – пшениця; 3 – соя; 4 – гарбуз.

Вперше визначено питому теплоту випаровування насіння гарбуза при температурі теплоносія 60°C, що більше за значення теплоти випаровування дистильованої води на 6 – 7% (рис. 26).

Дані експериментальних досліджень із визначення теплоємності та теплоти випаровування були застосовані при визначенні критерію Ребіндера

Характеристикою кінетики процесу сушіння є число Ребіндера ( $Rb$ ), яке визначає відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу та на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = b \frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left( \frac{d\bar{t}}{dW} \right) \quad (11)$$

Критерій Ребіндера підтверджує, що процес сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур йде ефективно за запропонованими режимами сушіння і майже вся теплота витрачається на випаровування вологи з матеріалу (рис. 28).

Коефіцієнт теплопередачі знаходиться за формулою 12.

$$\alpha = \frac{q(\tau)}{(t - \theta)}, \quad (12)$$

Критерій Нусельта характеризує збільшення інтенсивності теплообміну за рахунок конвективних струмів в порівнянні з чистою теплопровідністю:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{\Pi}}, \quad (13)$$

Отримані рівняння вказують на різних характер проходження тепломасообмінних процесів при сушінні насінневих матеріалів.

**В шостому розділі „Розробка енергоефективних теплотехнологій та обладнання для отримання насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур” на основі комплексних досліджень тепломасообмінних процесів сушіння насіннєвого зерна.**

Енергоефективна теплотехнологія та технологічно-апаратурна лінія виробництва високоякісного насіння зернових, олійних та технічних культур включає в себе стадії: приймання насіння, попереднього очищення, сушіння на розроблених ступеневих режимах сушіння, зберігання насіння, розділення на фракції, протравлювання, пакування в мішки.

Для реалізації технології отримання насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур розроблена технологічно-апаратурна схема із встановлення в 5 зонної зерносушарки із тепловим насосом (рис. 31).

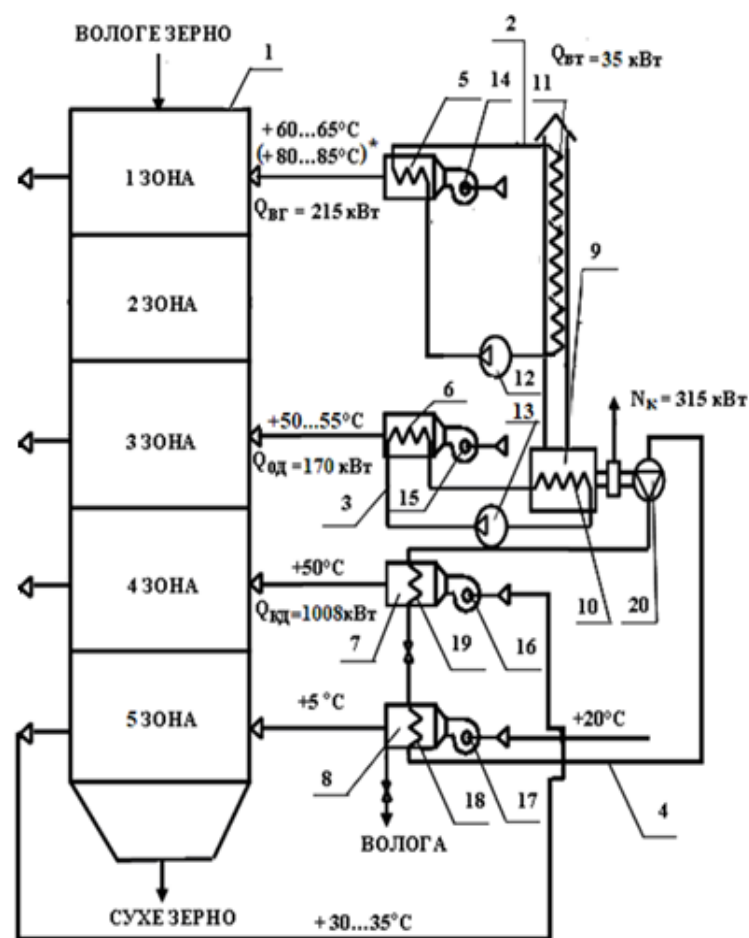


Рис. 31. Теплотехнічна схема роботи п'ятизонної шахтної зерносушарки безперервної дії продуктивністю 15,5 т/год. із тепловим насосом та газовим двигуном генератором для сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур: 1 – сушильна шахта; 2,3,4 – контури циркуляції робочої речовини; 5,6,7,8 – теплообмінники; 9 – газовий двигун генератор; 10,11 – теплоутилізатори; 12, 13 – циркуляційні насоси; 14, 15, 16, 17 – напірні вентилятори; 18 – випарник; 19 – конденсатор; 20 – компресор.

Розроблена теплотехнічна схема роботи п'ятизонної шахтної зерносушарки ТН-15,5 із тепловим насосом та дизель генератора ДвГА – 315 для сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур, яка працює наступним чином: вологе зерно надходить в I зону зерносушарки, де відбувається нагрівання та зневоднення насіння при температурі теплоносія 60 – 65°C від системи утилізації теплоти димових газів, яка складається з теплообмінника 5, теплоутилізатора 11 та циркуляційного насоса 12.

Підігріте і частково зневоднене зерно надходить в II зону тепломасообміну, де відбувається перерозподіл теплоти та вологи в матеріалі без нагрівання і продування матеріалу.

В III зоні продовжується тепловологістна обробка насіння при температурі теплоносія 50 – 55°C, нагрітим від утилізації теплоти з системи охолодження мастила газового двигуна генератора, яка складається з теплообмінника 6, теплоутилізатора 10 та циркуляційного насоса 13.

В IV зоні насіння сушіння при температурі теплоносія 50°C від

конденсатора теплового насосу 19 зі зниженими параметрами вологовмісту теплоносія. Нагрівання теплоносія у конденсаторі теплового насосу 19 відбувається від температури теплоносія 30...35°C до 50°C, що знижує залежність від температури навколишнього середовища в холодну пору року.

В V зоні насіння відбувається інтенсивне охолодження від випарника теплового насоса 18 при температурі 5°C. Зневоднений та підігрітий від зерна теплоносії додатково підігрівається до температури 50°C на конденсаторі теплового насосу 19 і направляється в IV зону для досушування зерна.

Комплексна підготовка теплоносія в тепловому насосі на базі дизель-генератора дає можливість зменшити енерговитрати на рівні 3024 кДж/кг вип. вологи. Очікуваний економічний ефект від запропонованих технічних рішень 858127 грн, при терміні окупності капітальних вкладень 5,5 р.

В Україні високими темпами розвивається насінневе овочівництво, після якого залишаються великі відходи овочів, які потрібно утилізувати. Для деяких селекційних господарств – це є екологічною проблемою.

Розроблена технологічна схема та лінія комплексної переробки томатів на насіння та харчовий порошок складається з наступних операцій: сепарування та видалення насіння томатів, відстоювання насіння разом з мезгою, промивання насіння, сушіння насіння томатів при температурі теплоносія 50°C, охолодження, фасування та пакування. М'якоть поєднується із стружкою буряку та подається на отримання порошку (рис. 32).

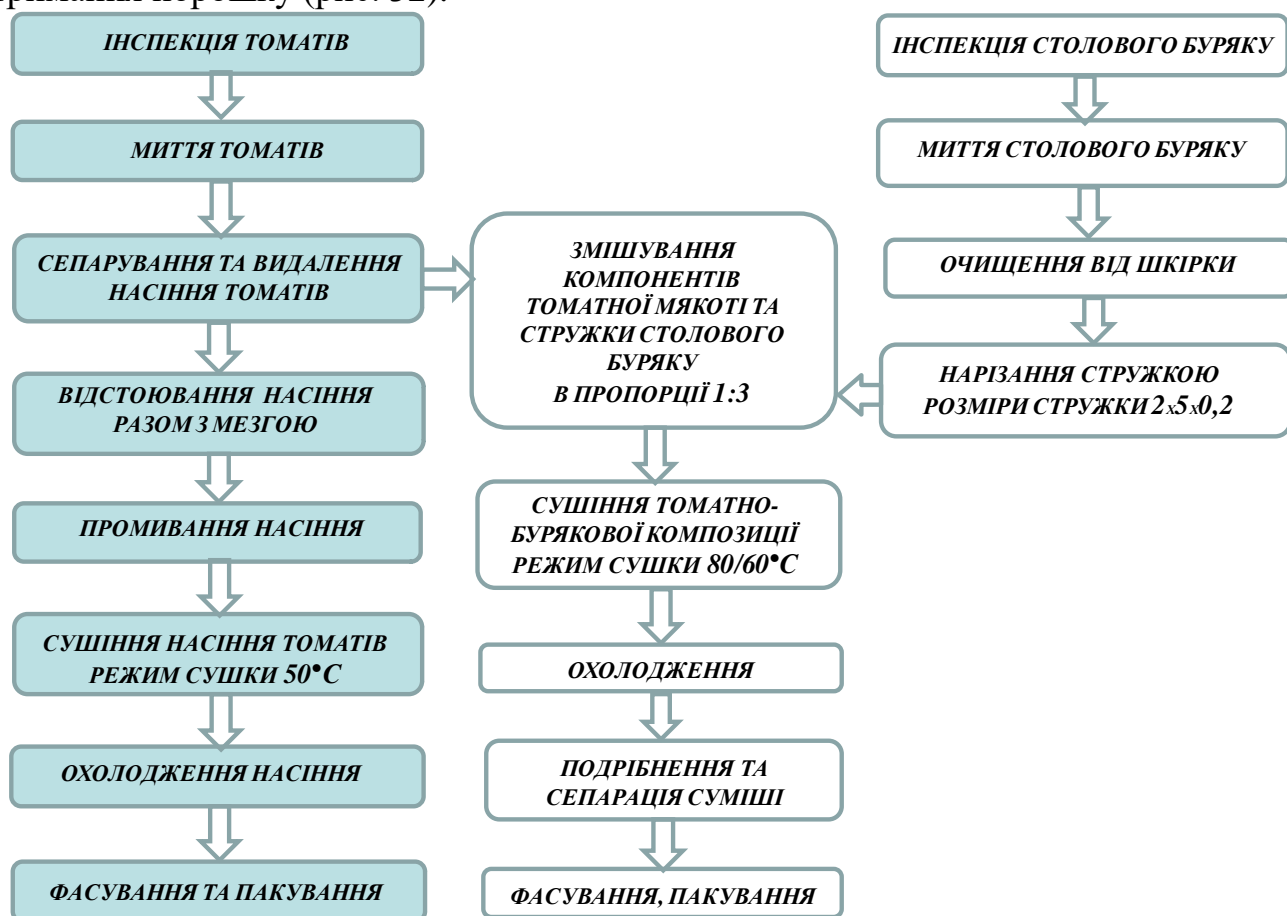


Рис. 32. Технологічна схема комплексної безвідходної переробки томатів

Технологічно-апаратурна схема отримання насіння томату та томатно-бурякового порошку представлено на рис. 33.

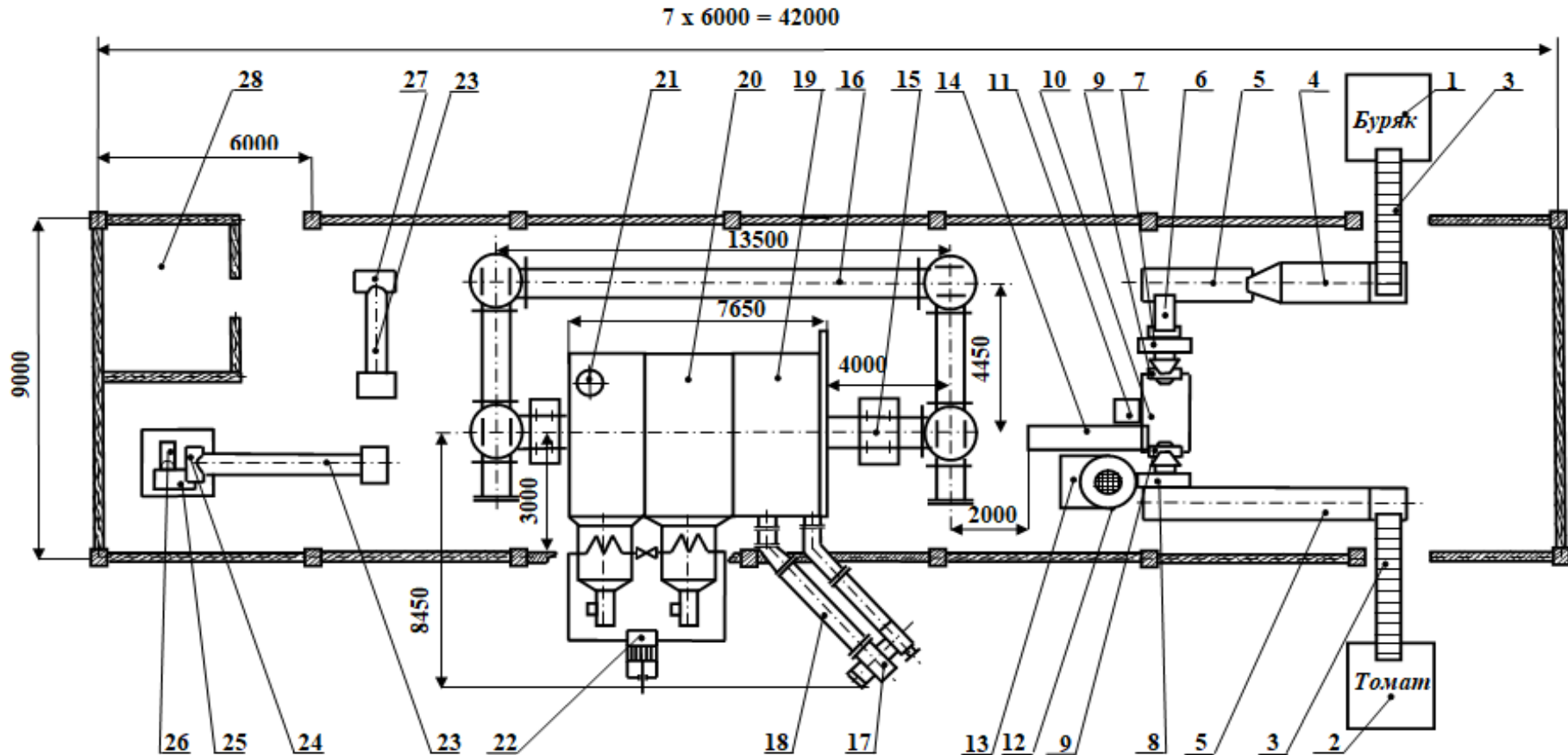


Рис. 33. Технологічно-апаратурна схема отримання насіння томату та томатно-бурякового порошку

1 – смінь для приймання буряку; 2 – смінь для миття томатів; 3 – транспортер елеваторний ТЕ; 4 – машина миюча барабанна Т1-КУ2-М; 5 – транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратор П - 100; 6 – машина для зняття шкірки буряку; 7 – машина для нарізання буряку А9КР2В; 8 – дробарка насінневідокремлювач для томату; 9 – дозатор ваговий МІ - 1540 - 91; 10 – лопатевий змішувач томату та буряку П - 500; 11 – розкладач томатно-бурякової суміші; 12 – ванна для відстоювання насіння; 13 – смінь для проціджування насіння; 14 - конвеєр стрічковий А9-КТФ для завантаження піддонів; 15 – візок з піддонів; 16 – колія рейкова; 17 – вентилятор; 18 – трубопровід; 19 – сушарка 1 зона сушіння на теплогенераторі ТФ2.03; 20 – сушарка 2 зона сушіння від конденсатора ТН; 21 – сушарка 3 зона охолодження від випарника ТН; 22 – тепловий насос; 23 – елеватор «Гусяча шия» А-6; 24 – мікромлин молотковий 10ММ; 25 – вібрсито РЗ-ВЦА; 26 – машина мішкозашивочна К4 – БУВ; 27 – машина для фасування в пакети; 28 – склад готової продукції.

Лінія із виробництва насіння з томатів та томатно-бурякового порошку складається із наступних ділянок: підготовки сировини до сушіння, сушіння, охолодження, подрібнення, сепарації, пакування та складу готової продукції.

Томат засипають у ємність з водою та миють (2), потім транспортером (3) подають на інспекційний транспортер ТСІ (4). Після чого томат нарізають, видаляють насіння на дробарці насінневідокремлювач для томату (8), а м'якоть подають в дозатор (9) і завантажують у лопатевий змішувач (10).

Після відділення від м'якоті і відстоювання отримане насіння розподіляється на піддонах на візку (15) і направляється в трьохзонну тунельну сушарку на встановленій рейковій колії (16). Трьохзонна тунельна сушарка працює в наступних температурних режимах:

- I зона сушіння (19) – відбувається сушіння томатно-бурякової суміші при температурі теплоносія 80°C - підготовка теплоносія проводиться від твердопаливного теплогенератора (18) з нагнітанням теплоносія вентилятором (17) в сушильну камеру;

- 2 зона сушіння (20) – працює як для сушіння другої ступені томатно-бурякової суміші при температурі 60°C або як для сушіння насіння томатів при температурі теплоносія 50°C – при можливості регулювання температури нагрівання теплоносія на конденсаторі теплового насоса;

- 3 зона охолодження (21) – охолодження томатно-бурякової композиції та насіння томатів від конденсатора теплового насоса при температурі +5 - 10°C.

Висушена томатно-бурякова сировина подрібнюється на мікрмлині молотковому 10-ММ (24), класифікується на циліндричному віброситі РЗ-ВЦА (25) і отриманий порошок пакують за допомогою мішкозашивочної машини К4-БУВ (26) і направляється в склад готової продукції (28).

Висушене томатне насіння надходить на пакування на пакувально-фасувальний автомат (27), де фасується в пакети по 0,5 кг.

Вперше розроблена безвідходна технологія та технологічно-апаратна схема переробки гарбуза за трьома напрямками: насіння гарбуза насінневого призначення, харчове насіння та харчові гарбузові порошки. За розробленою технологією відбувається повна переробка відходів м'якоті, яка не потребує утилізації.

В технологічній схемі застосовані ступеневі режими сушіння для насінневого зерна 60/40°C, харчового насіння та стружки гарбуза 80/60°C (рис. 34).

Для реалізації ступеневих режимів сушіння насіння гарбуза насінневого призначення встановлена тунельна сушарка із тепловим насосом, яка працює в схемі паралельно із двозонною сушаркою на твердопаливних або газових теплогенераторах для сушіння насіння харчового призначення та стружки гарбуза.

Розрахована економічна ефективність виробництва гарбузового насіння та харчового гарбузового порошку із собівартістю на 38 – 63% нижче за рахунок використання відходів з гарбуза. Основні витрати на виробництво складають паливо, заробітна плата та нарахування на з/п, що в сумі становлять 54 - 59%. Вартість сировини істотно впливає на собівартість, якщо використовувати відходи виробництва вартість сировини може суттєво зменшитись.

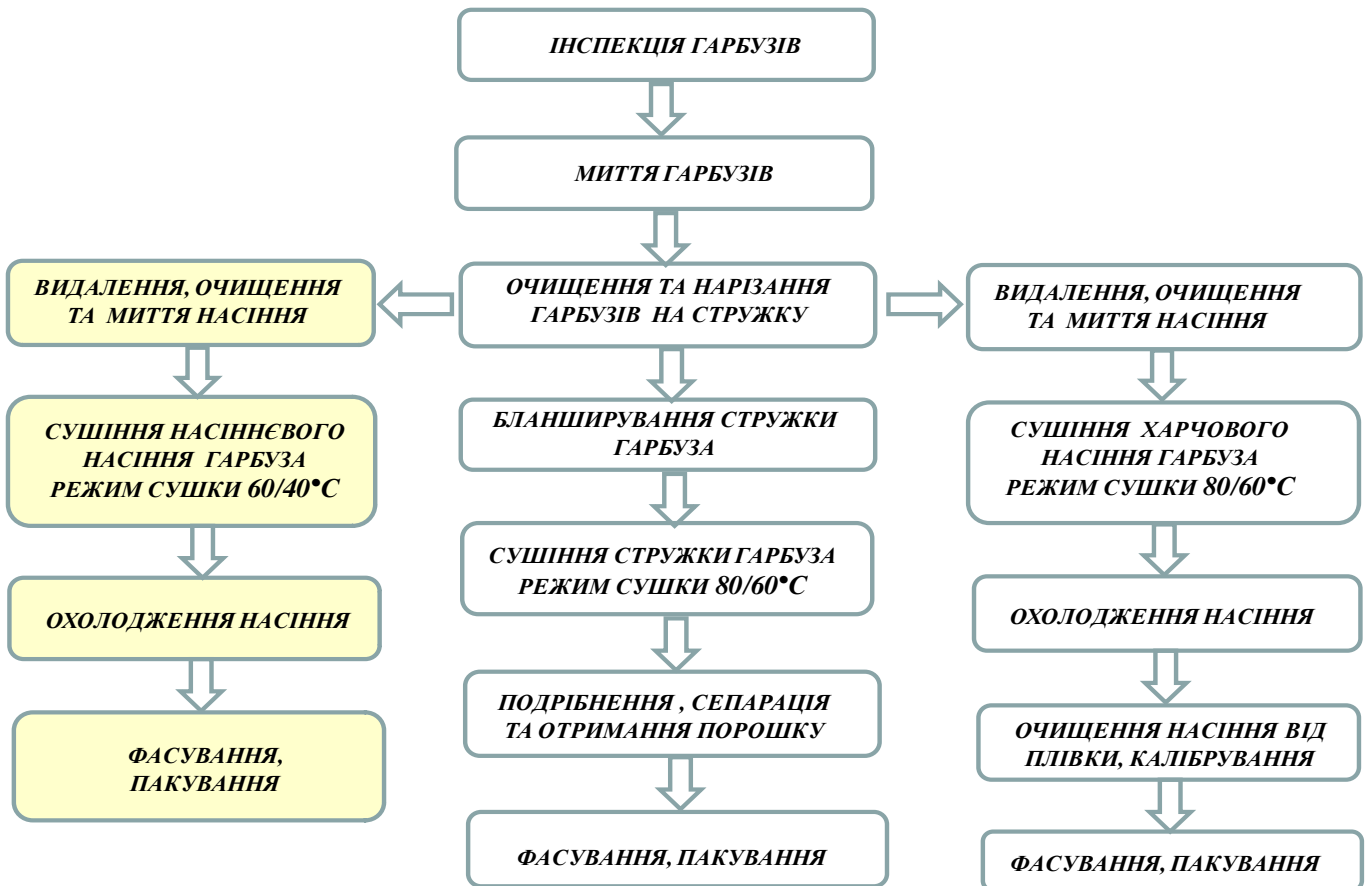


Рис. 34. Технологічна схема виробництва насіння насінневого та харчового призначення і харчового порошку із гарбуза

Також розроблена технологічна схема із виробництва насіння перцю та харчового порошку із раціональними режимами сушіння.

Результати роботи впроваджені на 3-х підприємствах:

- теплотехнології та обладнання для сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур на фермерських господарствах “Євгенія” (Кіровоградської обл.), “Людмила-агро” (Вінницької обл.);
- теплотехнології та обладнання для виробництва насіння та харчового порошку овочевих культур на ТОВ “Іжа майбутнього” (м. Київ).

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлені результати досліджень сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур з метою вдосконалення та розробки енергоефективних режимів сушіння, тепло технологій та обладнання на базі теплового насосу.

1. Проведений енергетичний аналіз зерносушильної техніки для сушіння продовольчого зерна, показав що сушильні установки мають коефіцієнт корисної дії близько 50% і споживають в 2...2,5 раз більше енергії, ніж фізично необхідно. Для сушіння насінневого матеріалу витрати енергії ще збільшуються в 1,3 – 1,4 рази в порівнянні із продовольчим зерном, що обґрунтовує доцільність розробки енергоефективного сушильного обладнання.



2. Визначені закономірності кінетики сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур в елементарному шарі та встановлено, що процес проходить в періоді падаючої швидкості сушіння, що пов'язано із інтенсивним одночасним прогріванням та випаровуванням вологи з матеріалу.

3. Отриманні регресійні рівняння, побудовані поверхні відгуку схожості насіння, температура нагрівання насіння та тривалості сушіння від впливу температури та швидкості руху теплоносія і початкової вологості насіння.

4. У процесі математичного моделювання встановлено, що на тривалість сушіння, температуру нагрівання матеріалу та схожість насіння впливають всі фактори, але найбільший вплив спостерігається від температури теплоносія.

5. Вперше визначено граничнодопустиму температуру нагрівання насіння зернових культур на основі аналізу експериментальних даних схожості та кінетики процесу доведено, що можливо підвищити граничнодопустиму температуру нагрівання матеріалу на 4 - 8 °С від раніше рекомендованих.

6. Вперше розроблені ступеневі режими сушіння для насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, що дали змогу отримати схожість насіннєвого матеріалу 98 – 100%, при зменшенні тривалості сушіння в 1,7 – 3,4 рази та енерговитрат на 62%.

7. Розроблені енергоефективні режими сушіння із використанням теплових насосів для сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, зокрема для сушіння насіння гарбуза застосовано режим сушіння 60/40°C. Витрати теплоти менші від нормативних показників для насіннєвого зерна на 40%. Забезпечується висока схожість насіння на рівні 100%.

8. З узагальнених кривих сушіння визначені критичні точки, розраховані відносні коефіцієнти та кінетичні коефіцієнти сушіння, отримані рівняння узагальнених кривих сушіння та отримані формули швидкості сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

9. Розраховані формули тривалості сушіння для насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, При порівнянні дослідної та розрахункової тривалості сушіння насіння пшениці, сої, гарбуза та ріпаку відхилення значень не перевищує 3%.

10. Вперше визначена теплоємність та питомі теплоти випаровування насіння овочевих культур Отримані формули розрахунку теплоємності насіння сої та гарбуза в діапазоні температур 30 – 92°C.

11. На основі отриманих експериментальних даних побудовані криві та визначені залежності числа Ребіндера, коефіцієнта тепловіддачі та критерії Нусельта від параметрів процесу.

12. Розроблена теплотехнологія сушіння при використанні схеми п'ятизонної зерносушарки безперервної дії ТН-15,5 т/год. на базі газового дизель генератора та теплового насосу із застосування ступеневих режимів сушіння насіння зернових та технічних культур з питомими витратами теплоти 3024 кДж/кг вип. вологи.

13. Розроблено безвідходні енергоефективні теплотехнології та промислово-технологічні лінії для отримання насіння овочевих культур із застосування теплових насосів.

14. Проведено техніко-економічне обґрунтування впровадження п'ятизонної зерносушарки безперервної дії продуктивністю 15,5 т/год з терміном окупності 5,5р. Розрахована економічна ефективність виробництва гарбузового насіння та харчового гарбузового порошку із собівартістю на 38 – 63% нижче за рахунок використання відходів з гарбуза.

15. Отримані результати впроваджені для сушіння насіння зернових та олійних культур на фермерських господарствах: “Євгенія” (Кіровоградської обл.) та “Людмила-агро” (Вінницької обл.).

Теплотехнології та обладнання для виробництва насіння та харчового порошку овочевих культур впроваджено на ТОВ “Іжа майбутнього” (м. Київ).

### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$W$  – вологість матеріалу, %;  $W_{II}$  – початкова вологість матеріалу, %;  $W_p$  – рівноважна вологість насіння, %;  $t$  – температура теплоносія, °С;  $V$  – швидкість руху теплоносія, м/с;  $d$  – вологовміст повітря, г/кг с. п.;  $\delta$  – товщина шару зерна, м;  $\tau$  – тривалість процесу сушіння, с;  $N = dW/d\tau$  – швидкість сушіння, %/хв.;  $\theta$  – температура нагрівання насіння, °С;  $E$  – енергія проростання, %;  $C$  – схожість, %;  $\rho$  – насипна щільність насіння, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup> К;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $c$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  – коефіцієнт теплової активності, Дж/(м<sup>2</sup>·К·с<sup>1/2</sup>);  $K$  – коефіцієнт сушіння;  $\chi$  – відносний коефіцієнт сушіння;  $Q$  – питомі витрати теплоти, кДж/ кг вип. вологи;  $r$  – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг;  $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $b$  – температурний коефіцієнт сушіння;  $Rb$  – критерій Ребіндера;  $Nu$  – критерій Нусельта;  $\mu$  – коефіцієнт перетворення теплового насосу

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### *Монографії*

1. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. Монографія. Київ: видавництво ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с. (Здобувачем у співавторстві).
2. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Енергоефективне виробництво функціональних харчових порошків. Монографія. Вінниця: видавництво «РВВ ВНАУ», 2016. 458 с. (Здобувачем у співавторстві).
3. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Самойленко К.М. Ефективні технології сушіння насіння овочів. Монографія. Вінниця: видавництво «РВВ ВНАУ», 2019. 129 с. (Здобувачем у співавторстві).

#### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

4. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О. Вплив режимів режиму сушіння на якісні показники зерна насінневого призначення. Наукові праці ОДАХТ, Одеса, 2011. Вип.40, Т.1. С. 39 – 43.



*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у проведенні досліджень та співавторстві наведених наукових положень).*

5. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Михайлик Т.О., Пазюк В.М. Відстежимо закономірності зневоднення пшениці, ячменю та вівса в елементарному шарі в залежності від вологості теплоносія. *Зерно і хліб*. 2011. № 2. С. 46 – 47.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

6. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М. Исследование влияние параметров сушки на кинетику и получение качественных, антиоксидатных функциональных порошков. *Промышленная теплотехника*. 2012. № 5. С. 31 – 36.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у проведенні досліджень з кінетики сушіння функціональної рослинної сировини).*

7. Пазюк В.М. Теплові насоси як засіб підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету в сфері технічні науки*. Вінниця, ВНАУ, 2012. № 11. С. 375 – 378.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у проведенні та аналізу літературних досліджень).*

8. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Гідротермічна обробка функціональної сировини. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2012. Вип. 41. Т.1. С. 13 – 18.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

9. Пазюк В.М. Ступінчаті режими сушіння рослинної сировини з антиоксидантними властивостями. *Вібрація в техніці та технологіях*. 2013. № 3. С. 126 – 129.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у проведенні досліджень з кінетики сушіння антиоксидантної рослинної сировини).*

10. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Дослідження процесу подрібнення та класифікації функціональної антиоксидантної буряково-лимонної сировини. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2013. Вип. 43. Т.1. С. 105 – 109.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

11. Пазюк В.М. Основні напрямки зменшення енергетичних витрат в схемах сушіння зерна з тепловим насосом. *Відновлювальна енергетика*. 2014. № 1(36). С. 76 – 81.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у проведенні та аналізі літературних досліджень).*

12. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Тепломасообмінні процеси при сушінні функціональної сировини. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2014. Вип.41. Т.2. С. 303 – 308.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

13. Пазюк В.М., Пазюк О.Д., Савчук В.В. Сучасні зерносушарки та заходи з їх енергетичного вдосконалення. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». 2015. №2(90). С.57-62.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у визначенні внеску в підвищенні енергоефективності процесу сушіння).*

14. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Самойленко К.М., Пазюк О.Д. Застосування ступінчатих режимів при сушінні насіння пшениці. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2015. Вип. 47. Том 2. С. 29 – 33.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

15. Petrova Zn., Snezhkin Y., Pazyuk V., Samoilenko K. Drying of antioxidant Composite Materials based on Table Beet. Energy engineering and control systems. 2015. Vol.1, № 1. p. 25 – 28.

*(Наукове фахове видання України, CrossRef, ICI Journals Master List)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

16. Пазюк В.М., Пазюк О.Д., Романенко М.Д. Енергозберігаючі режими сушіння насіннєвого зерна та реалізація їх у вібраційній зерносушарці. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях» 2016. №3 (83). С.202-206.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

17. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Дуб В.В. Створення нових теплотехнологій отримання якісних фолатовмісних функціональних порошків. Збірник наукових праць ХДУХТ. Харків, 2016. Вип. 1 (23). С. 80-89.

*(Наукове фахове видання України, Index Copernicus, Google Scholar, Academic Resource Index (Research Bib), Info Base Index, Cite Factor, Scientific Indexing Services (SIS)).*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень).*

18. Пазюк В.М. Теплонасосні сушильні установки в процесах сушіння зерна. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». 2016. №2 (94). С.53-57.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у розробці та підвищенні енергоефективності процесу сушіння насіння зернових культур)*

19. Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Розробка комплексного пайку для гарячого харчування спец призначенців. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». 2017. №2 (97). С.76-80.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

20. Pazyuk V., Petrova Zn., Chepeliuk O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. Ukrainian Food Journal. 2018. Volume 7, Issue 1. P. 135 – 150.

*(Наукове фахове видання України, Web of science Emerging Sources Citaton Index, Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, UlrichsWeb, CABI full text, Online Library of University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Directory of Open Access scholarly Resources (ROAD), European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH PLUS), Directory of Open Access Journals (DOAJ), InfoBase Index, Chemical Abstracts Service Source Index (CASSI), FSTA (Food Science and Technology Abstracts).*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

21. Petrova Zn., Pazyuk V., Samoilenko K., Chepeliuk O. Effect of treatment modes on quality and antioxidant properties of tomato and beet processing products. Ukrainian Food Journal. 2018. Volume 7, Issue 2. P. 291 – 302.

*(Наукове фахове видання України, Web of science Emerging Sources Citaton Index, Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, UlrichsWeb, CABI full text, Online Library of University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Directory of Open Access scholarly Resources (ROAD), European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH PLUS), Directory of Open Access Journals (DOAJ), InfoBase Index, Chemical Abstracts Service Source Index (CASSI), FSTA (Food Science and Technology Abstracts).*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

22. Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Дуб В.В. Сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності процесу сушіння насіння зернових культур. Збірник наукових праць ХДУХТ. Харків, 2018. Вип. 1 (27). С. 231-243.

*(Наукове фахове видання України, Index Copernicus, Google Scholar, Academic Resource Index (Research Bib), Info Base Index, Cite Factor, Scientific Indexing Services (SIS)).*

*(Особистий внесок автора полягає у постановці та в розробці заходів із підвищення енергоефективності процесу сушіння).*

23. Пазюк В.М., Рубаненко О.О., Вишнівський В.М. Підвищення енергоефективності сушіння насіння зернових культур шляхом застосування теплових насосів. Вісник Хмельницького національного університету. 2018. № 4. С.251-253.

*(Наукове фахове видання України, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ, Polish Scholarly Bibliography)*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

24. Пазюк В.М. Дослідження низькотемпературних режимів сушіння рослинних капілярно-пористих матеріалів сферичної форми. КЕРАМІКА: наука і життя. 2018. № 4. С.7-14.

*(Наукове фахове видання України, Crossref, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського, Cosmos Impact Factor).*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

25. Пазюк В.М. Обґрунтування режимів сушіння насіння гарбуза насінневого призначення з конвективним підведенням теплоти. Збірник наукових праць ХДУХТ. Харків. 2018. Вип. 2 (28). С. 155-165.

*(Наукове фахове видання України, Index Copernicus, Google Scholar, Academic Resource Index (Research Bib), Info Base Index, Cite Factor, Scientific Indexing Services (SIS))*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

26. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Volume 56, No 3, P. 39 – 48.

*(ELSEVIER /SciVerse SCOPUS, CLARIVATE ANALYTICS' WEB OF SCIENCE- Emerging Sources Citation Index (ESCI), ULRICHS Web: Global Serials Directory, CABI, SCPIO, Index COPERNICUS International, EBSCO Publishing, Elektronische Zeitschriftenbibliothek).*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

27. Пазюк В.М. Дослідження тепломасообмінних процесів сушіння насіння овочевих культур. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2018. Т. 82. Вип 2. С. 129 – 136.

*(Наукове фахове видання України)*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

28. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О. Математична обробка результатів експериментальних досліджень низькотемпературних режимів сушіння капілярно-пористих матеріалів сферичної форми. КЕРАМІКА: наука і життя. 2019. № 1. С.20-25.

*(Наукове фахове видання України, Crossref, Research Bible, Scientific Indexing Services, Journal Factor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, World Catalogue of Scientific Journals, Google Scholar, Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського, Cosmos Impact Factor).*

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальнення результатів).*

*Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

29. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Ефективна технологія отримання антиоксидантних порошків. Удосконалення процесів та обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 10 – 11 квітня 2012 р). Київ, НУХТ. 2012. С. 129 – 131.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

30. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М. Энергоэффективный режим сушки антиоксидантного растительного сырья. XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений (г. Минск, 10 – 13 сентября 2012 г). Минск, ММФ. 2012. С. 608 – 611.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

31. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. Функціональні порошки з рослинної сировини. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: матеріали 2-го Міжнародного конгресу (м. Львів, 19 – 22 вересня 2012). Львів, ЗУКЦ. 2012. С. 98.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

32. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М., Декуша Л.В. О теплоте испарения функционального растительного сырья. Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии (НЭРПО-2013): материалы 3-й международной научно-технической конференции (г. Москва, 23-26 сентября 2013). Москва, МГОУ. 2013. С. 167 – 171.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

33. Петрова Ж.О., Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М. Розробка енергозберігаючих технологій виробництва функціональних порошків. Сучасні технології харчових виробництв: матеріали 1-й міжнародної науково-практичної конференції (м. Вінниця, 26-27 березня 2015). Вінниця, ВНАУ. 2015. С. 56 – 59.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

34. Пазюк В.М. Сушіння насінневого зерна в теплонасосній сушильній установці. Енергоощадні машини і технології: тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 29 вересня – 1 жовтня 2015). Київ, КНУБА. 2015. С. 83.

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальненні результатів).*

35. Пазюк В.М. Удосконалення процесів та обладнання для сушіння насінневого зерна. Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей Міжнародно-практичної конференції (м. Харків-Мелітополь –Кирилівка, 8 – 11 вересня 2015). Харків-Мелітополь – Кирилівка, ХДУХТ. 2015. С. 69 – 70.

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальненні результатів).*

36. Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Самойленко К.М. Ресурсозберігаюча технологія отримання насіння томатів та антиоксидантних порошків на основі томату та буряку. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності: матеріали VII Міжнародної

спеціалізованої науково-практичної конференції (м. Київ, 13 вересня 2018). Київ, НУХТ. 2018. С. 43 – 45.

*(Особистий внесок автора полягає у співавторстві наведених положень)*

37. Пазюк В.М. Підвищення енергоефективності сушіння насіння зернових культур із тепловими насосами. Удосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв: збірник наукових праць XVII міжнародної наукової конференції (м. Одеса, 3-8 вересня 2018). Одеса, ОНАХТ. 2018. С. 116 – 120.

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальненні результатів).*

38. Пазюк В.М. Удосконалення процесів та обладнання для сушіння насіння рослинних культур і розробка безвідходних енергоефективних теплотехнологій. Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 15 травня 2018). Харків, ХДУХТ. 2019. С. 229 – 230.

*(Особистий внесок автора полягає у розробленні методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, узагальненні результатів).*

*Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:*

#### **Патенти на винахід:**

39. Патент на винахід № 107899. (UA) Україна, С2 МПК А23 L1/212. Спосіб одержання фітоестрогенного порошку з насіння ріпаку та моркви. Петрова Ж.О., Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Воронцов М.Є.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики, опубл. 25.02.15, бюл. 4.

*(Особистий внесок автора полягає в участі та розробці способу, узагальненні результатів).*

40. Патент на винахід № 109083. (UA) Україна, С2 МПК А23 В7/02. Лінія для виробництва композиційних антиоксидантних порошків з рослинної сировини. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Гетманюк К.М.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики, опубл. 10.07.15, бюл. 13.

*(Особистий внесок автора полягає в участі та розробці лінії для виробництва композиційних антиоксидантних порошків).*

41. Патент на винахід № 115015. (UA) Україна, С2 МПК F26В9/00. Установа для сушіння рослинної сировини. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Ловейко І.О., Петрова Ж.О.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики, опубл. 28.08.17, бюл. 16.

*(Особистий внесок автора полягає в участі та розробці установки для сушіння рослинної сировини, узагальненні результатів).*

#### **Технічні умови України**

42. Технічні умови «Порошки антиоксидантні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-045:2012. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Гетманюк К.М. *(Автор приймав участь у розробці нових видів харчових продуктів з антиоксидантними властивостями та затвердженні нормативної документації).*

43. Технічні умови «Порошки фолатовмісні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-046:2012. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. *(Автор приймав*

*участь у розробці нових видів харчових продуктів з фолатовмісними властивостями та затвердженні нормативної документації).*

44. Технічні умови «Порошки фітоестрогенні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-047:2012. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. *(Автор приймав участь у розробці нових видів харчових продуктів з пребіотичними властивостями та затвердженні нормативної документації).*

45. Технічні умови «Порошки пребіотичні з рослинної сировини» ТУ У 10.3-05417118-048:2012. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М. *(Автор приймав участь у розробці нових видів харчових продуктів з пребіотичними властивостями та затвердженні нормативної документації).*

## АНОТАЦІЯ

### **Пазюк В. М. Теплотехнічні основи сушіння насіннєвого зерна – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 – Теплоенергетика) – Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми підвищення інтенсивності та енергетичної ефективності сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур з збереженням високої схожості посівного матеріалу.

Поставлена проблема вирішується через визначення оптимальних режимів сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур та розробки енергозберігаючих теплотехнологій із застосуванням теплових насосів з метою збереження високої якості матеріалу.

В роботі наведені результати експериментальних та теоретичних досліджень основних закономірностей сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, сформульована математична модель процесу і визначені раціональні параметри сушіння, проведені дослідження тепломасообмінних процесів, розроблені енергоефективні режими сушіння, нові теплотехнології та обладнання з використанням теплових насосів.

На основі проведених комплексних досліджень на конвективному сушильному стенді розроблена інженерна номограма визначення граничнодопустимої температури нагрівання насіння зернових культур із даних експериментальних досліджень кінетики процесу та якісних характеристик матеріалу.

За результатами експериментальних досліджень виготовлені сушильні стенди із тепловим насосом та випробовувані розроблені енергоефективні режими сушіння з високою схожістю насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур.

Розроблена теплотехнічна схема п'ятизонної шахтної зерносушарки безперервної дії продуктивністю 15,5 т/год. для сушіння насіння зернових, олійних та технічних культур із використання теплого насоса та газового двигуна генератора ДвГА – 315. Енергоефективність процесу сушіння насіннєвого матеріалу забезпечується розподілення потоків виробленої теплової енергії газового двигуна генератора і направлення в 1,3,4 зону сушіння шахти зерносушарки із застосування ступеневих режимів сушіння.

Розраховані питомі витрати теплоти складають 3024 кДж/кг вип. вологи, очікуваний економічний ефект від впровадження 858127 грн., при терміні окупності капітальних вкладень 5,5 року.

Для виробництва насіння овочевих культур розроблені 3 енергоефективні безвідходні технології переробки томатів, гарбуза та перцю із встановлення теплових насосів. На собівартість насіння овочевих культур найбільше впливає вартість палива та сировини, а також заробітна плата працівників. Зниження собівартості можливо через застосування енергоефективних режимів сушіння із тепловими насосами та використання відходів виробництва.

**Ключові слова:** насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур, інтенсифікація, сушіння, енергоефективність, схожість, питомі витрати теплоти, теплові насоси, теплотехнологія, обладнання.

## ABSTRACT

### **Paziuk V.M. Heat-engineering bases of drying of seed grain - Manuscript.**

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.14.06 – technical thermophysics and industrial heat power engineering (144 - thermal power engineering) - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving of the scientific and applied problem of increasing the intensity and energy efficiency of drying seeds of cereals, oilseeds, vegetables and technical crops with the preservation of high similarity of the sowing material.

The problem is solved by determining the optimal drying regimes of seeds of cereals, oilseeds, vegetables and technical crops and the development of energy-saving heat technology drying with the use of heat pumps for the purpose to preservation high quality properties of material.

For the first time, stepped drying regimes for seeds of cereals, oilseeds, vegetables and industrial crops have been developed, which allowed to obtain a similarity of seed material 98 - 100%, with a reduction in the drying time of 1.7 - 3.4 times and energy consumption by 62%.

The dissertation presents the results of experimental and theoretical studies of the basic laws of drying seeds of cereals, oilseeds, vegetables and technical crops; the mathematical model of the process is formulated and the rational parameters of drying are determined, researches of heat-mass-exchange processes are carried out, energy-efficient drying regimes, new heat engineering and equipment with the use of heat pumps are developed.

On the basis of the complex research carried out on the convective drying stand, an engineering nomogram for determining the permissible temperature of heating of seeds of grain crops was developed from experimental studies of kinetics of the process and qualitative characteristics of the material.

According to the results of experimental research, drying stands with a heat pump are made and energy-efficient drying regimes with a high similarity of grain seeds, oilseeds, vegetables and industrial crops was tested.



Energy-efficient drying modes have been developed using heat pumps for drying seeds of cereals, oilseeds, vegetables and industrial crops, in particular for drying pumpkin seeds, a drying regime of 60/40°C was used. Consumption of heat is lower than the standard values for seed grain by 40%. High seed germination is ensured at 100% level.

Calculations of specific heat consumption during drying of seed material in a heat pump are 3675 - 3700 kJ / kg of evaporated moisture.

The heat engineering scheme of the five-zone mining grains of continuous action with the productivity of 15.5 t/h is developed. for the drying of seeds of cereals, oil and technical crops using the heat pump and the gas engine of the generator DvGA-315. The energy efficiency of the drying process of seed material is ensured by the distribution of flows of the generated thermal energy of the gas engine of the generator and directed into the 1,3,4 zone of drying of the grain dryer from the application of stepped drying modes.

The calculated specific heat consumption is 3024 kJ/kg of power moisture, expected economic effect from the implementation of 858127 UAH, with a period of payback of capital investments 5.5 years.

For the production of vegetable seeds, 3 energy-efficient non-waste technologies for the processing of tomatoes, pumpkin and pepper from the installation of heat pumps have been developed. The cost of seeds of vegetable crops is most influenced by the cost of fuel and raw materials, as well as the wages of employees. Cost reduction is possible due to the use of energy-efficient drying modes with heat pumps and the use of waste products.

**Key words:** seeds of cereals, oilseeds, vegetables and industrial crops, intensification, drying, energy efficiency, germination, specific heat consumption, heat pumps, heat engineering, equipment.