

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



ПЕТУШЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.565.3:664.723

**РОЗРОБКА СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ПЕРВИННОЇ
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗЕР-
НА ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність 05.05.14 – холодильна, вакуумна та
компресорна техніка, системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одесса – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник :

доктор технічних наук, професор

Тітлов Олександр Сергійович

завідувач кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, професор

Радченко Микола Іванович,

завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

доктор технічних наук, професор

Потапов Володимир Олексійович

завідуючий кафедрою енергетичного машинобудування, інженерних та фізико-математичних дисциплін Харківського державного університету харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться 27 вересня 2021 року. в 10⁰⁰, в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна

Автореферат розісланий 26 серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному світі все більш затребуваними стають системи холодильної техніки, зокрема, системи безперервного холодильного ланцюга, без яких не можна в повній мірі забезпечити продовольчу безпеку. Особливий інтерес має місце до систем штучного охолодження в зерновому господарстві України, яке є однією з бюджетоутворюючих галузей країни.

Зерно - це один з найважливіших основних продуктів харчування людини, для вирощування і збору якого залучаються великі ресурси. Післязбиральна обробка і зберігання - це ключова ланка у виробництві зерна. За даними продовольчої і сільськогосподарської організації ООН (ФАО), в світі щорічно псується близько 20 % зібраних зернових.

Скорочення втрат зерна на всіх етапах збирання, транспортування, зберігання і переробки і забезпечення його схоронності визначається технологією післязбиральної обробки. В умовах все зростаючих обсягів зерна і високих темпів збиральних робіт проблема збереження врожаю, більше половини якого збирається у вологому стані, стає все більш гострою. Свіжозібране вологе насіннєве зерно є нестійким при зберіганні і вимагає негайної обробки.

Принципово охолодження вологої зернової маси можливо природним зовнішнім повітрям або штучно охолодженням за допомогою спеціальних установок. Але, охолоджуюча здатність засобів активного вентилявання залежить від погодних умов, тому нерідко вологе зерно не вдається охолодити до необхідної температури, внаслідок чого відбувається псування насіння від самозігрівання і пліснявіння.

Низькотемпературна консервація в місцях заготовок дозволяє вирішити проблему тривалого та якісного зберігання зернової продукції, але в даний час така техніка відсутня. Слід зазначити, що серед усіх типів зернових продуктів найбільший ефект від первинної низькотемпературної обробки може бути досягнутий для сортів дрібного зерна (ріпак, льон, просо, гірчиця). Вони, через незначний властивий лінійний розмір, найбільш схильні до пошкодження при сушінні нагріванням.

Розробка систем первинного охолодження передбачає наявність інформації щодо методів розрахунку процесів тепломасообміну в умовах низькотемпературної обробки дрібносем'яного зерна охолодженням і висушенням повітрям, яка в даний час відсутня.

Відсутня також методологія створення систем первинного низькотемпературного охолодження, яка дозволяє мінімізувати енергоспоживання холодильних машин в умовах добових і сезонних коливань температур атмосферного повітря, в тому числі і за допомогою тепловикористовуючих аміачних абсорбційних холодильних машин з неелектричними джерелами теплової енергії

У зв'язку з вищевикладеним **актуальною** стає розробка систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання дрібнонасінного зерна, в якій враховуються особливості процесів тепломасообміну між зерном і охолодженням повітрям і мінімізуються енерговитрати при виробництві штучного холоду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно:

– до Закону України «Про енергозбереження» (Постанова Верховної Ради України № 75/94-ВР от 01.07.1997 р.);

– планами бюджетних науково-дослідних робіт за бюджетною науково-дослідною роботою МОН України: «Розробка теоретичних основ термічної обробки та зберігання дрібнонасінневих олійних культур» (№ державної реєстрації 0106U001401, період 01.01.2008р. – 31.12.2010р.) і «Науково-технічні основи зберігання і переробки біополімерів рослинного походження з використанням тепла та холоду» (№ державної реєстрації 0111U000219, період 01.01.2011р. – 31.12.2013р.), які були виконані на базі Проблемної науково-дослідної лабораторії Комплексної переробки рослинної сировини в харчові та кормові продукти Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ);

- з планами наукових досліджень кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики ОНАХТ.

Мета дослідження – розробка систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **основні завдання**:

а) провести аналіз сучасного технічного і технологічного стану розробок і досліджень систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур і визначити найбільш перспективні;

б) розробити методику розрахунку процесів тепломасообміну в умовах низькотемпературної обробки дрібнонасінневих зернових продуктів;

в) провести експериментальні дослідження особливостей режимів обробки дрібнонасінневого зерна з метою підтвердження результатів розрахунків;

г) розробити перспективні енергоощадні системи первинного низькотемпературної обробки та зберігання зерна, в тому числі і за допомогою альтернативних поновлюваних джерел енергії.

Об'єкт дослідження - системи охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур.

Предмет дослідження - процеси тепломасообміну і гідравлічні режими при охолодженні дрібнонасінневих культур, схеми та режими роботи систем низькотемпературного охолодження.

Методи дослідження:

Моделювання процесів тепло- масообміну в умовах низькотемпературної обробки дрібнонасінневих зернових продуктів з використанням аналітичних і чисельних методів.

Експериментальні - визначення особливостей теплових та гідравлічних режимів обробки дрібнонасінневих зернових продуктів в широкому діапазоні температур для первинної низькотемпературної обробки та зберігання і коригування математичних моделей.

Наукова новизна результатів роботи:

1. Отримали подальший розвиток модельні уявлення процесів тепломасообміну в умовах низькотемпературної обробки зерна дрібнонасінневих культур, які врахують виникнення рівноважного стану по висоті оброблюваного

шару зерна і припинення процесу зневоднення зерна, що дозволяє сформувані вихідні дані для розробки систем первинного охолодження та зберігання дрібнонасіненного зерна.

2. Вперше виконано експериментальні дослідження режимів низькотемпературної обробки дрібнонасіненого зерна до 9 °C і отримані безрозмірні залежності впливу швидкості холодного повітряного потоку та геометричних параметрів системи охолодження на інтенсивність теплообміну, які дозволяють знаходити енергоощадні режими охолодження якості зерна при первинній низькотемпературній обробці та тривалого (до 1 року) зберігання і прогнозувати тепловологісні параметри і тривалість процесу низькотемпературного зневоднення зерна.

3. Отримали подальший розвиток розробки холодильних систем охолодження за рахунок комбінації циклів аміачних компресійних і водоаміачних абсорбційних холодильних машин в одній конструкції, що дозволяє використовувати як електричні, так і альтернативні джерела енергії. Відмінною характеристикою комбінованої холодильної установки є мінімізація кількості циркулюючого аміаку між випарником і конденсатором. Запропонована схема комбінованої холодильної машини дозволяє забезпечувати необхідні режими охолодження з мінімальними витратами електричної енергії протягом перехідних і холодного періоду року.

4. Вперше для роботи в польових умовах запропоновано АВХМ з абсорбером з повітряним відведенням тепла в навколишнє середовище за допомогою двофазних термосифонів і з ребрами в зоні конденсації. Така конструкція дозволяє забезпечити роботу АВХМ без прив'язки до водних ресурсів.

5. Вперше запропоновано дві схеми систем первинного охолодження зерна – контейнерного та підлогового типу у складі мобільного холодильного ланцюга, кожна з яких може бути використана в фермерських та селянських господарствах України в залежності від обсягу перероблюємої продукції.

Достовірність наукових положень і результатів забезпечується: коректною постановкою завдань теоретичного дослідження в частині моделювання процесів тепломасообміну і гідравлічних режимів при тепловології обробки зерна потоком охолодженого повітря; використанням сучасних методів аналітичного моделювання; порівняльним аналізом розрахункових і експериментальних результатів, при якому граничними умовами є параметри реальних об'єктів дослідження; використанням сучасного вимірювального обладнання, що дозволяє забезпечити необхідну точність.

Практичне значення отриманих результатів:

Результати роботи у вигляді стаціонарної холодильної системи з парокомпресійною установкою впроваджено у сільськогосподарському кооперативі «ЕДЕМ», Одеська обл., Білгород-Дністровський район, село Адамівка у частині розробки системи первинної холодильної обробки зернової продукції на базі стаціонарної холодильної системи з парокомпресійної установкою.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем проведено аналіз сучасного стану досліджень [1-12], проведено моделювання процесів тепломасообміну [1, 5, 8],

виконані розрахунки і аналіз режимних параметрів елементів АХА [2-4, 5, 7], проведені експериментальні дослідження та виконаний аналіз отриманих результатів [3, 4, 6, 7, 9], підготовлено матеріали до публікації [1-12]. Конкретний внесок автора в опубліковані в співавторстві наукові праці наведено в списку основних публікацій за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації.

Результати дисертації представлялися на 22 науково-практичних форумах різного рівня, в тому числі на: I Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефригерації» (Миколаїв, 2008); IV Всеукраїнському науково-технічному семінарі «Удосконалення малої хладотеплотехніки і забезпечування нею технологічних процесів» (Донецьк, 2009); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Низкотемпературные технологии при первичной обработке зерновых продуктов» (Могилев, 2009), Humboldt-College “Sciences, Engineering, and Humanities for the Energy World”, (Одеса, 2009); Міжнародній науково-практичній конференції (Харків, 2009); XIII міжвузівській науково-методичній конференції «Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в вузах», (Одеса, 2009); 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (Одеса, 2009), V Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення малої хладотеплотехніки – використання холоду в харчовій галузі» (Донецьк, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», (Миколаїв, 2010); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів : сьогодення та перспективи», (Київ, 2010); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми техніки і технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі», (Харків, 2010); XIV міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики і екології», (Одеса, 2011); Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», (Миколаїв, 2011); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», (Миколаїв, 2012); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», (Одеса, 2013); V Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», (Миколаїв, 2014); Міжнародній науковій конференції «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти в харчовій промисловості», (Київ, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Казахстан-Холод 2015» (Алмати, 2015); III Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті», (Миколаїв, 2015), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», (Одеса, 2016); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», (Миколаїв, 2016); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті», (Миколаїв, 2017).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 8 затверджених спеціалізованих науково-технічних виданнях України (з них 1 **Scopus**), в 8 додаткових

статтях і в 36 тезах доповідей на міжнародних, національних і регіональних науково-технічних конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 основних розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 156 наукових робіт, 3 додатки. Повний обсяг роботи становить 178 сторінок, в тому числі 13 таблиць, 65 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, відображено зв'язок з державними програмами і темами, сформульовано цілі та основні завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, дано відомості про апробацію результатів дисертації та основні публікації.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного стану розробок технічних та технологічних способів низькотемпературної обробки і зберігання зерна. Відзначено внесок в розробку інноваційних технологій обробки зерна вітчизняних і зарубіжних вчених таких як: Анискин В.И., Бошкова І.Л., Бурдо О.Г., Гапонюк І.І., Гапонюк О.І., Горбис В.Н., Жадан В.З, Календарьян В.О., Мельник Б.Е., Овсяникова Л.К., Онищенко В.П., Остапчук М.В., Петруня Б.І., Станкевич Г.М., Трисвятский Л.А., Чайковський В.Ф., Boterill J., Krischer O., Urban B. E.

Вивчена можливість застосування відомих технічних рішень для досягнення поставленої мети за допомогою сучасних парокомпресійних, повітряних і тепловикористовуючих холодильних машин. Виконаний детальний аналіз відомих методів розрахунку і моделювання елементів і конструкцій систем низькотемпературної обробки і зберігання зерна.

З урахуванням проведеного аналізу поставлені завдання досліджень.

У **другому розділі** виконано теоретичні дослідження систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіненних культур.

На першому етапі було виконано моделювання процесів тепломасообміну при охолодженні нерухомому шару зерна. При розробці методу моделювання було врахована односпрямованість потоків тепла і маси, на відміну від взаємодії з зерном нагрітого повітря або продуктів згоряння.

Як об'єкт розрахунку розглядається штабель зерна висотою H . Продукт охолоджується повітрям, що подається через нижній перетин штабеля. Теплообміном з навколишнім середовищем нехтуємо.

Щільний шар продукту, що продувається, розглядається як двокомпонентна система проникаючих компонентів — газового і твердого. В обох компонентах дисперсної системи протікають процеси тепломасопереносу, між ними — процеси конвективного тепло- і масообміну. Кожен компонент розглядається як квазігомогенне середовище з ефективними коефіцієнтами переносу, різними для поздовжнього і поперечного напрямків.

Ефективні коефіцієнти теплопровідності враховують перенесення теплоти кондукцією в продукті, через контакти і газовий прошарок між ними, випромінюванням. Відповідні коефіцієнти для газового компонента враховують кондукцію і випромінювання в газі, а також конвективний перенос теплоти.

Теплота пароутворення враховується в якості теплоти охолодження зерна. Опір масопереносу в зерні не враховується. Теплоємність тари прийнята зневажливо малою. Розподіли швидкості газового середовища і порозності шару по перетину прийняті рівномірними.

Математичний опис процесів зміни стану повітря в насипу рослинної продукції складається з системи трьох диференціальних рівнянь, складених, для відшукування змінних величин, які цікавлять нас: t – температура повітря; ϑ – температура зерна; p – парціальний тиск водяної пари в повітрі.

Зазначена система рівнянь має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega \frac{\partial t}{\partial h} + \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\alpha \cdot F}{c_n \cdot \rho_n \cdot \varepsilon} (\vartheta - t) \\ -\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\alpha \cdot F}{c_n \cdot \rho_n} \cdot (\vartheta - t) + \frac{\alpha \cdot F \cdot r \cdot \varepsilon_F}{Z \cdot \rho_z \cdot c_z} (p^* - p) \\ \frac{0,622}{\bar{p}} \cdot \left(\omega \cdot \frac{\partial p}{\partial h} + \frac{\partial p}{\partial \tau} \right) = \frac{\alpha \cdot F}{Z \cdot \rho_n} (p^* - p) \end{array} \right\} (1)$$

де, ω – швидкість повітря в насипу, м/с; ϑ – температура зерна, К; t – температура повітря, К; ∂h – елементарна висота насипу, м; $\partial \tau$ – елементарний проміжок часу, с; α – коефіцієнт конвективного теплообміну від повітря до поверхні зерна, Вт/(м²·К); F – поверхня зерна на одиницю об'єму насипу, м²/м³; c_n – теплоємність повітря, кДж/(кг·К); ρ_z – насипна вага зерна, кг/м³; ε – коефіцієнт шпаруватості; p^* – тиск насичення водяної пари при температурі ϑ , Па; ρ_n – густина повітря, кг/м³; c_z – теплоємність зерна, кДж/(кг·К); $Z = \alpha / \beta_p \cdot \varepsilon$, β_p – наведений коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків, кг/(м²·с·Па); ε_F – коефіцієнт, що враховує частку поверхні зерна в масообміні; p – парціальний тиск водяної пари в повітрі, Па; $\bar{p}$ – середній парціальний тиск сухого повітря, Па; r – прихована теплота пароутворення, кДж/кг.

Система рівнянь (1) отримана при наступних припущеннях: нерівномірність температурного поля в елементах продукції можна знехтувати; теплофізичні властивості елементів насипу і повітря прийняті незалежними від температури; швидкість повітря незмінна по висоті насипу і в часі; внутрішній термічний опір зерна ріпаку безконечно малий; інтенсивністю дихання зерна в процесі охолодження повітрям можна знехтувати, так як при зниженні температури дихання знижується, а при температурах (від 0 до 10 °С) інтенсивність дихання зерна дуже незначна; співвідношення інтенсивності процесів конвективного теплообміну і масообміну в процесі продувки повітря через шар зерна не змінюється по висоті шару.

Система рівнянь вирішується при наступних крайових умовах: $\tau = 0, h = 0 \Rightarrow: \vartheta = \vartheta_{(0)}; t = t_{(0)}; \vartheta_{(0)} > t_{(0)}; p = p_{(0)}; p^*_{(0)} = f(\vartheta_{(0)}) > p_{(0)}$.

Тобто в початковий період в нижню частину штабеля зернової маси, що знаходиться в термодинамічній рівновазі з атмосферним повітрям, надходить з повітроохолоджувача холодний повітряний потік з низьким вологовмістом, але з високою відносною вологістю.

Аналіз співвідношення (1) показує, що в міру проходження повітряного потоку через шар зерна проходить вирівнювання температур повітря і зерна. тобто зерно охолоджується за рахунок теплообміну і випару води, а температура повітря і його вміст вологи в процесі взаємодії з зерном зростає. У той же час зниження температури зерна призводить до зростання його рівноважної вологості, що перешкоджає випаровуванню вологи. Внесок кожного фактору можна оцінити тільки кількісним шляхом при знанні всіх складових системи (1). Однак в систему рівнянь (1) входять невідомі коефіцієнти тепло- і масообміну (α, β) в умовах низькотемпературної обробки дрібнонасінного зерна, що не дозволяє в повній мірі провести моделювання процесів тепломасообміну і визначити необхідні тепловологові параметри холодного повітряного потоку.

Приведем оцінку кінетики охолодження зерна ріпаку в потоці холодного повітря від температури 35 °С до 4 °С.

Для цього розглянемо зернинку ріпаку як шар. Будемо вважати постійними при охолодженні температуру холодного теплоносія (повітря) мінус 4 °С і коефіцієнт конвективного теплообміну на поверхні зернинки ($\alpha = \text{const}$).

Для вирішення практичних задач технологічного процесу нам потрібно знати температуру в центрі зернинки у всі періоди її холодильної обробки.

Рішення такої задачі має наступний вигляд:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu - \mu \cos \mu) \sin(\mu R)}{(\mu - \sin \mu \cos \mu) \mu R} * \exp(-\mu^2 * Fo) \quad (3)$$

де, $\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ - безрозмірна теперішня температура;

$R = \frac{r}{r_0}$ - безрозмірна теперішня координата;

μ - постійна в рівнянні (3), яка являється коренем характерного рівняння

$$\text{tg } \mu = -\frac{\rho U}{Bi - 1} \quad (4)$$

Будемо варіювати чисельне значення $\alpha = 0,8; 1,8; 2,0; 100,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Розрахункові рівняння кінетики охолодження зернинки буде мати наступний вигляд:

$$t = 31 \cdot A - 4 \quad (5)$$

де, $A = \frac{\sin \sqrt{3Bi}}{\sqrt{3Bi}} \exp(-3Bi * Fo)$

Графічні залежності, побудовані за рівнянням (5), показані на рис.1.

Їх аналіз показує, що чисельні значення коефіцієнта конвективного теплообміну практично не впливають на протікання процесу в початковому короткому періоді.

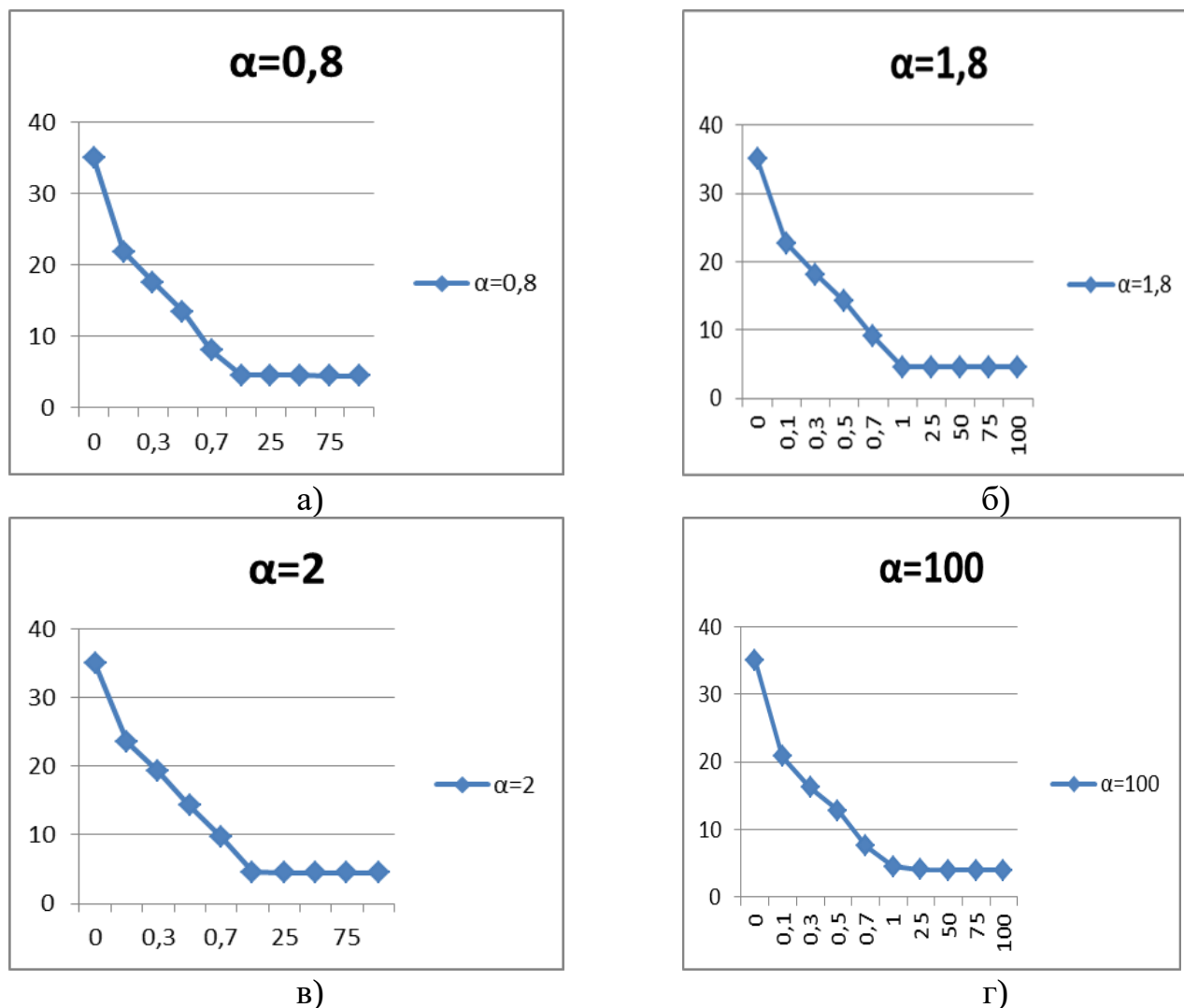


Рис. 1. Кінетика процесів охолодження ріпака в залежності від інтенсивності зовнішнього теплообміну: а) $\alpha=0.8$ Вт/(м²·К); б) $\alpha=1.8$ Вт/(м²·К); в) $\alpha=2$ Вт/(м²·К); г) $\alpha=100$ Вт/(м²·К)

Проведено аналіз еколого-енергетичних характеристик сучасного холодильного обладнання на різних робочих тілах для визначення перспектив використання в польових умовах.

Наведено, що найбільші перспективи в системах первинного охолодження зерна має природна робоча речовина — аміак, який володіє до того ж найкращими екологічними характеристиками (рис.2). Відповідно в частині холодопродуктивності і енергетичної ефективності і незалежності від водних ресурсів можна рекомендувати аміачні парокомпресійні холодильні машини (ПКХМ).

Проведені теоретичні дослідження дозволили вивчити теплофізичні аспекти процесів низькотемпературного охолодження дрібнонасінного зерна, однак для кількісної оцінки температурних режимів охолодження необхідно провести експериментальні дослідження натурних об'єктів.

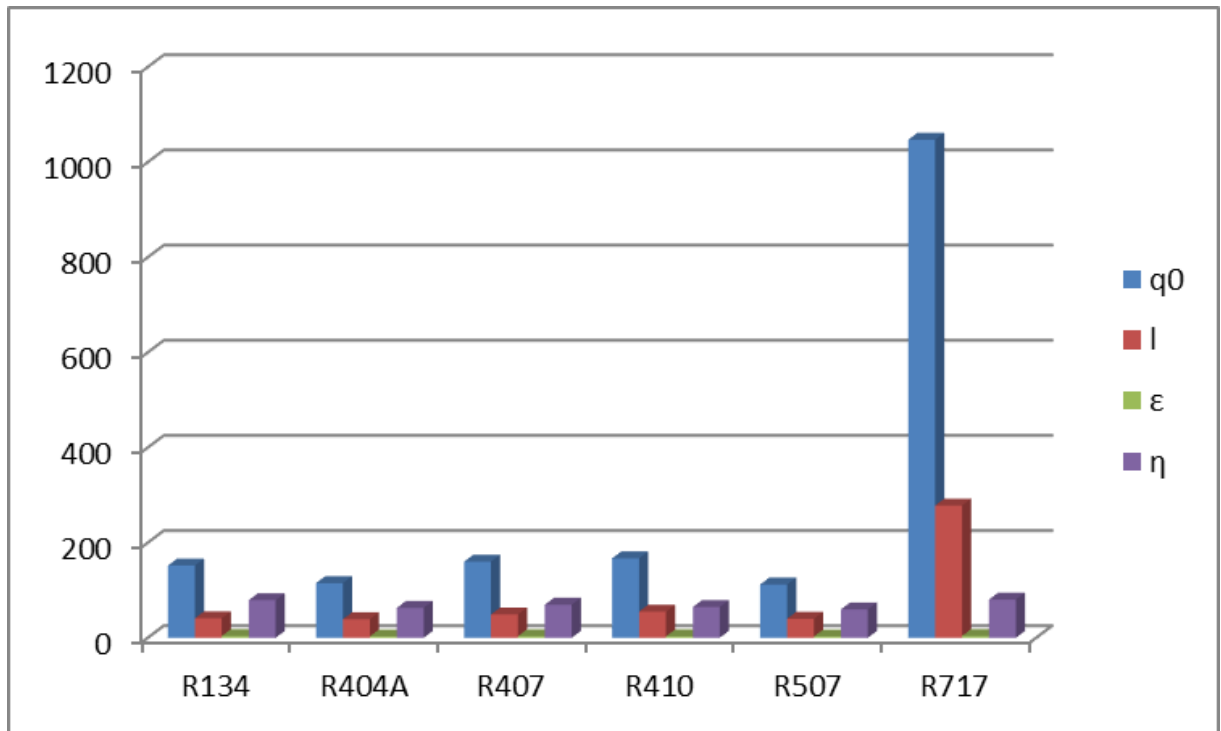


Рис.2. Загальна діаграма порівняння енергетичних характеристик циклів парокомпресійних холодильних машин на різних робочих тілах

У третьому розділі виконано експериментальні дослідження систем низькотемпературної обробки та зберігання дрібнонасінневих культур.

Цілями експериментального дослідження є: режими низькотемпературної обробки різних дрібнонасінних (в тому числі олійних) культур; вивчення закономірностей впливу різноманітних конструктивних і геометричних параметрів на їх тепло- масообмінні характеристики.

Для досягнення цих цілей була виготовлена спеціалізована експериментальна холодильна установка (рис.3).

Проведення експериментальних досліджень на установці виконувалося наступним чином. Спочатку проводилося тарування швидкості руху повітря на виході з зернового шару. Для цього в експериментальний осередок містилося зерно ріпаку. Висота засипки визначалася мірною шкалою на прозорому віконці відповідно 100 мм, 200 мм і 275 мм. Змінюючи швидкість обертання вентилятора, доводили значення швидкості повітряного потоку на виході з зернового шару до $v = 0,8$ м/с. Тиск контролювався мікроманометром, а швидкість потоку повітря визначалася за формулою

$$v = 1,29 \sqrt{H \cdot g}, \text{ м/с.} \quad (6)$$

Для більш точного визначення впливу процесу охолодження на дрібнонасінневе зерно здійснювалося попереднє включення холодильної машини і вихід на заданий температурно-вологісний режим холодильної установки. Попередньо підготовлене зерно ріпаку, зволожене і підігріте в термостаті, містилося в експериментальний осередок. При цьому спочатку зважувалася маса самого осередку, а потім разом з зерном на лабораторних електронних вагах.

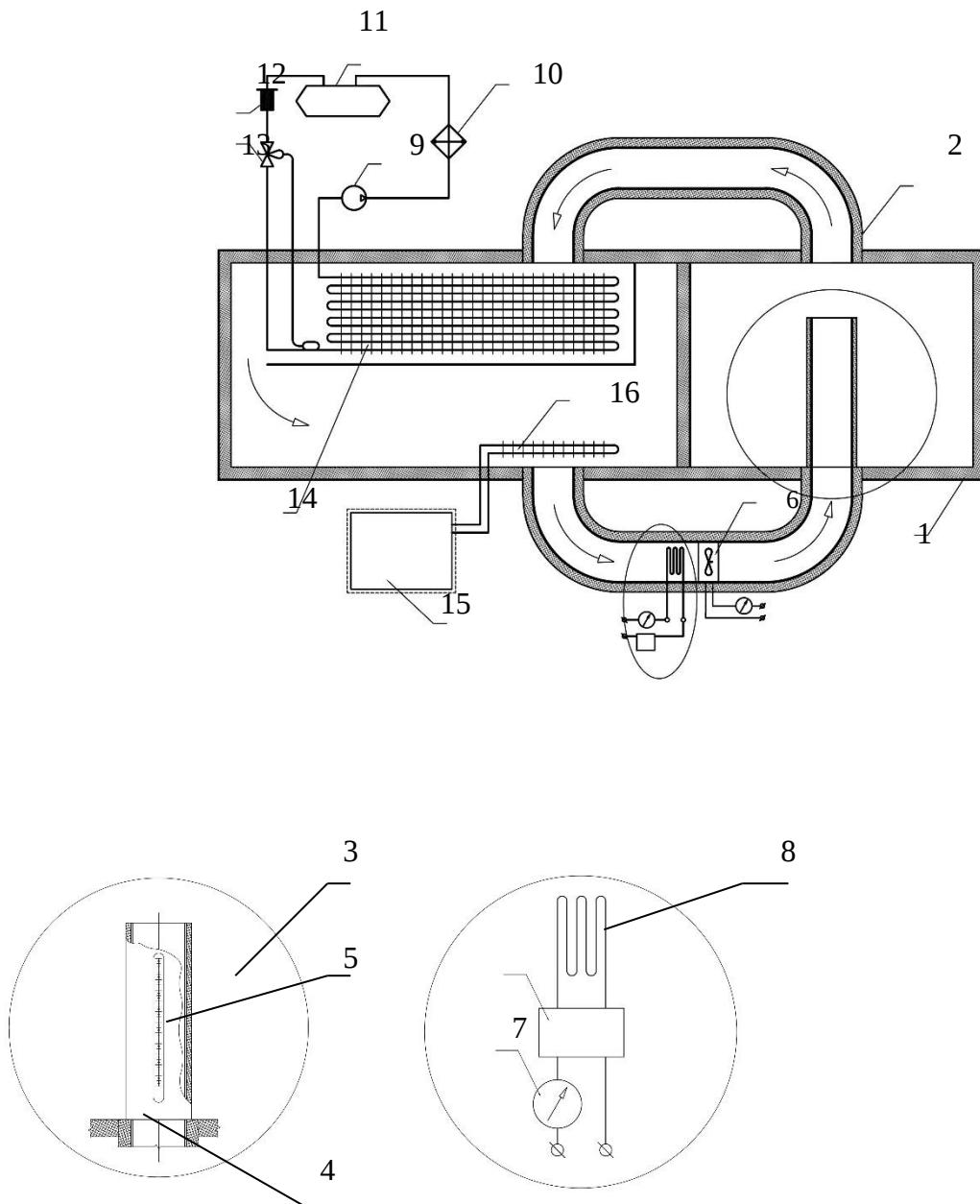


Рис. 3. Принципова схема експериментальної установки з використанням штучно охолодженого повітря для систем низькотемпературної обробки зерна дрібнонасіненних культур: 1 - теплоізолюваний корпус; 2 - повітроводи; 3 - експериментальний осередок; 4 - металева сітка; 5 - мірна шкала; 6 - нагнітаючий вентилятор; 7 - ЛАТР; 8 - електричний нагрівач; 9 - герметичний компресор; 10 - повітряний конденсатор; 11 - ресивер; 12 - фільтр-осушувач; 13 - терморегулюючий клапан TN 2 Danfoss; 14 - ребристо змієвиковою батарея; 15 - додатковий холодильний агрегат; 16 - дворядна ребристо змієвиковою батарея

Температура зерна визначалася за допомогою термометрів опору і електронного блоку. Заповнений осередок закладався в експериментальну камеру, при цьому конструкція з'єднання осередку з повітроводом забезпечувало герметичне швидко знімне з'єднання, яке не допускало бічних перетоків під час продування зерна повітряним потоком. Час відстежувалася за електронним секундоміром.

Через кожні 60 с експериментальний осередок з зерном виймався з камери, зважувався на електронних лабораторних вагах, при цьому проводилося вимірювання температури шару зерна у верхній частині (на відстані 10 мм від краю насипу) і в середній частині насипу. Після цього експериментальний осередок поміщався в камеру охолодження і експеримент тривав далі.

В ході експерименту контролювалися такі параметри: температура навколишнього середовища; температура повітря на вході в шар зерна; температура повітря на виході з шару зерна. Кожен експеримент закінчувався після досягнення заданої температури насипу зерна у верхній частині (на відстані 10 мм) незалежно від висоти шару. Початкова і кінцева вологість зерна визначалася за відомою методикою в лабораторних умовах на приладі СЕШ-3М.

В ході проведення експериментальних досліджень кінетики охолодження дрібно-насінних культур були отримані криві зміни температур повітря на вході і виході з шару зерна і температури зерна в шарі висотою 100 мм, 200 мм і 275 мм (рис.4).

На рис.4 наведені узагальнюючі залежності температур шару зерна в часі - кінетичні характеристики процесу охолодження.

Хід залежностей відповідає фізичним уявленням про процеси охолодження нерухомого шару зерна, що продувається потоком повітря з постійною масовою витратою.

Найбільш швидко охолоджується шар з мінімальною товщиною (100 мм), а з максимальною товщиною (275 мм) - за максимальний час.

На рис. 5 наведено графік зміни вмісту води зерна в залежності від зниження температури.

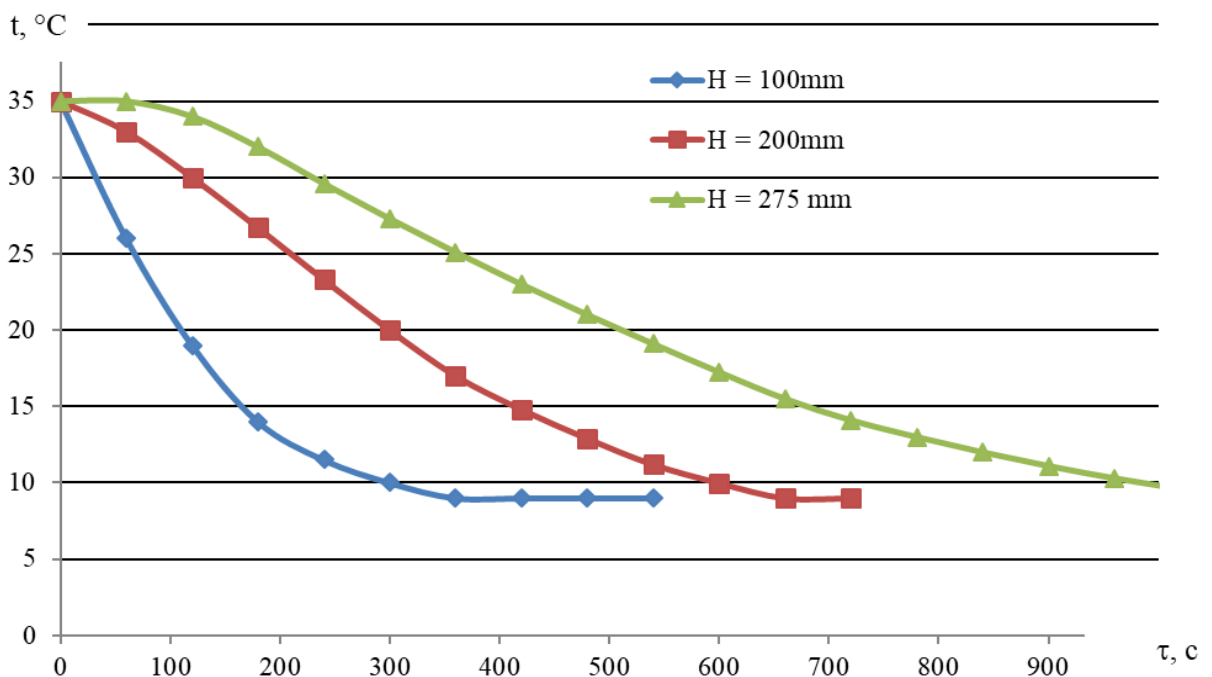


Рис.4. Зміна температури зерна в залежності від наповнення (завантаження) в часі

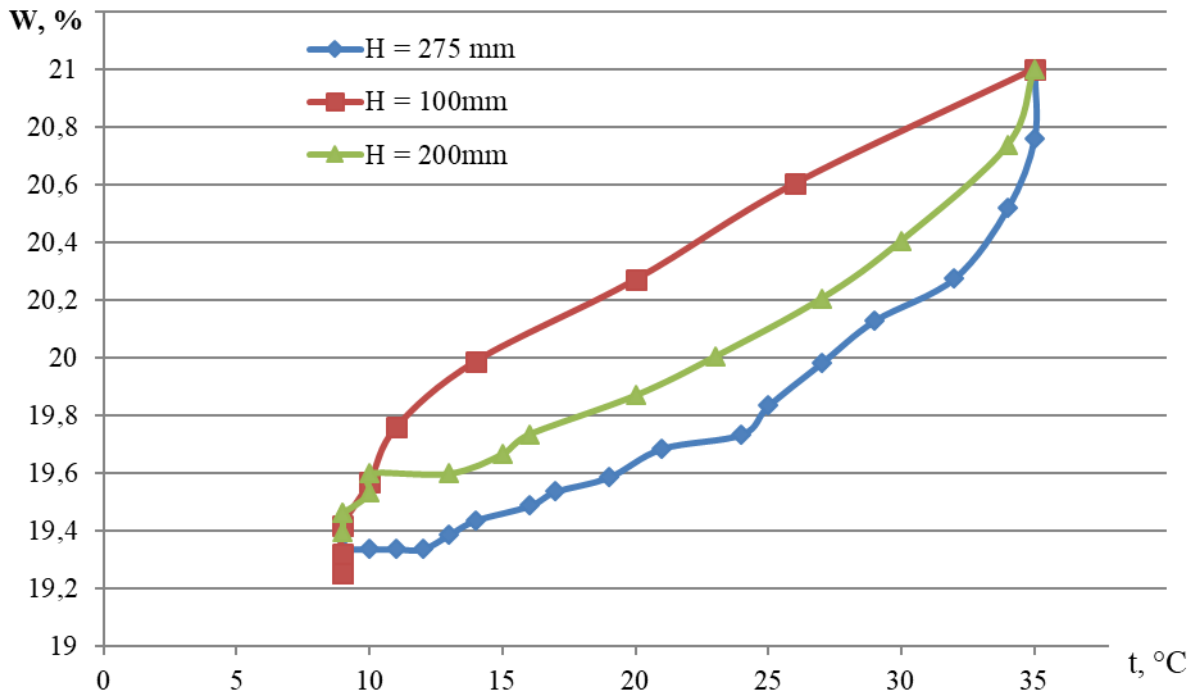


Рис.5. Графік зміни вмісту води зерна в залежності від зниження температури

Отримане рівняння для визначення коефіцієнта конвективного теплообміну ріпаку матиме такий вигляд:

$$Nu = 2 + 0.2 \cdot Re_{\varnothing}^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1.423}, \quad (6)$$

Діапазон зміни симплекса: $1,1 \leq \left(\frac{d}{h}\right) \leq 0,37$

Графік залежності коефіцієнта конвективного теплообміну від повітря до шару зерна наведено на рис.6.

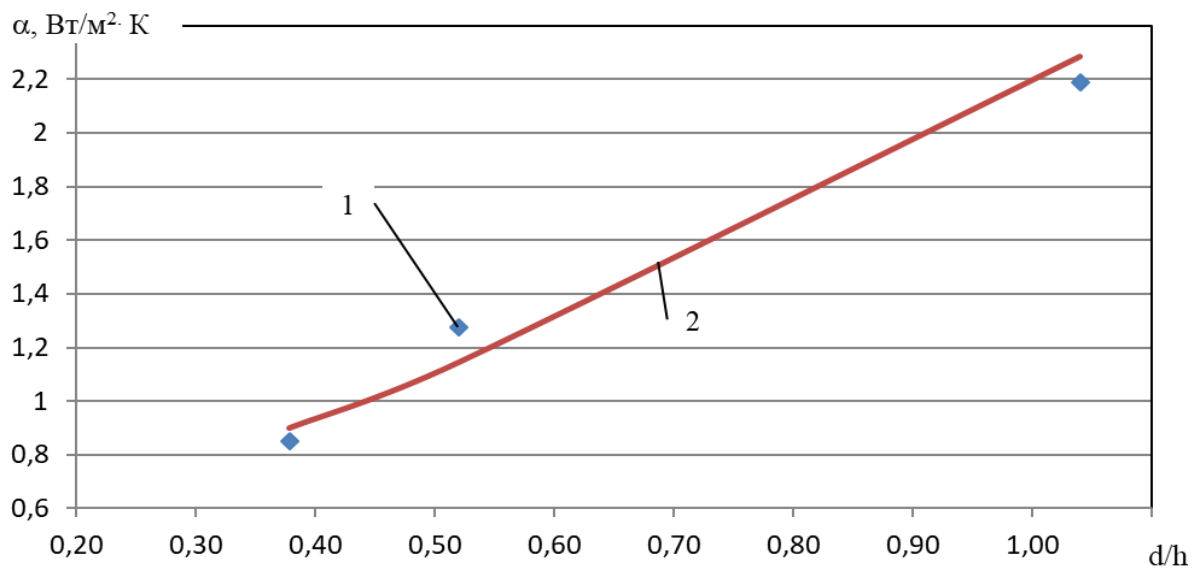


Рис. 6 Графік зміни коефіцієнта конвективного теплообміну від повітря до шару зерна: 1 – експеримент, 2 – розрахунок

Відносна середня похибка визначення розрахункового коефіцієнта конвективного теплообміну становить 10 %.

Обробка експериментальних результатів дозволяє отримати апроксимаційні залежності коефіцієнта масообміну від висоти шару зерна ріпаку

$$\beta^{-1} = (1,5052 + 0,9574 \cdot H \cdot \ln H - 1,3799) \cdot 10^{-10}, \text{кг} / (\text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2) \quad (7)$$

де H - висота шару зерна ріпаку, мм.

Максимальна похибка інтерполяції експериментальних даних формули (3.18) 16 %, середня похибка 12 %.

Аналогічний вид залежності має рушійний натиск парціальних тисків ΔP_{II} в процесі випаровування вологи з зерна в потік повітря

$$\Delta P_{II}^{-1} = \left(4,6104 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0393 / H - 0,0024 \cdot e^{-H} \right), \text{Па}. \quad (8)$$

де H - висота шару зерна ріпаку, мм.

Максимальна похибка інтерполяції експериментальних даних формули (8) 17 %, середня похибка 13 %.

Рівняння (8) отримано з урахуванням результатів досліджень в частині встановлення аналогії між інтенсивністю масообміну і перепадом парціальних тисків ΔP_{II} водяної пари при взаємодії з поверхнею зерна.

Гідравлічний опір шару зерна розраховувався за допомогою адаптованого для наших умов рівняння Кармана:

$$\Delta P = H \cdot K \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \mu_{II} \cdot a_o^2 \cdot V, \quad (9)$$

Розрахунок типового контейнера для охолодження зерна на прикладі ріпаку виконано кубічної форми $1 \times 1 \times 1$ м. Маса шару зерна-ріпаку 667,3 кг.

Розрахунок масообмінних параметрів процесу тепловологісного взаємодії шару зерна і холодного повітря показав, що для одного контейнера з масою зерна 667,3 кг і контактною поверхнею 1677 м^2 проходить процес масоопереходу води з зерна в повітряний потік з масовим витратою $0,0012 \text{ кг/с}$. За 1 годину це складе $4,32 \text{ кг}$. Якщо ми візьмемо первинну вологість зерна 16 %, то за одну годину його вологість може знизитися до 15,5 %. Цей оціночний результат показує можливість одночасного охолодження і часткового зневоднення зерна, тобто при холодильній обробці зерна можна забезпечити його низькотемпературну сушку до рівноважної вологості.

Аналіз результатів розрахунку показав, що зі збільшенням швидкості холодного повітряного потоку час охолодження контейнера із зерном від 35°C до 9°C знижується. У нашому випадку приблизно в 2 рази. У той же час збільшення швидкості повітряного потоку призводить до істотного збільшення гідравлічного опору шару зерна. Показане, що при швидкості повітряного потоку $0,2 \text{ м/с}$ опір повітряному потоку становитиме 1131 Па , а при швидкості $0,8 \text{ м/с}$ - 4523 Па . Відповідно потужність повітряного вентилятора становитиме 266 Вт і 5220 Вт .

Експериментальні дослідження дозволили визначити невідомі раніше коефіцієнти тепломасообміну при низькотемпературної обробки зерна, які необхідні для розробки інженерної методики розрахунку і проектування елементів системи охолодження.

У четвертому розділі представлено перспективні схеми і конструкції систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінних культур.

Комбінована холодильна машина (рис.7). З урахуванням особливостей режимів низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасінного зерна та еколого-енергетичних вимог, холодильна машина виконана в комбінованій схемі, яка складається з парокомпресійного з блоку ПКХМ і блоку АВХМ.

Відмінною характеристикою комбінованої холодильної установки є мінімізація кількості циркулюючого аміаку між випарником і конденсатором.

Мінімізація кількості аміаку дозволяє знизити заходи безпеки для персоналу і заходи пожежної безпеки при експлуатації.

Для її роботи не потрібно спеціальних водних джерел для відводу тепла від теплонавантажених елементів (конденсатора, абсорбера).

Так як конденсатор і випарник-повітроохолоджувач є загальними і для компресорної, і для абсорбційної це значно спрощує конструкцію, знижує металоємність і підвищує надійність роботи.

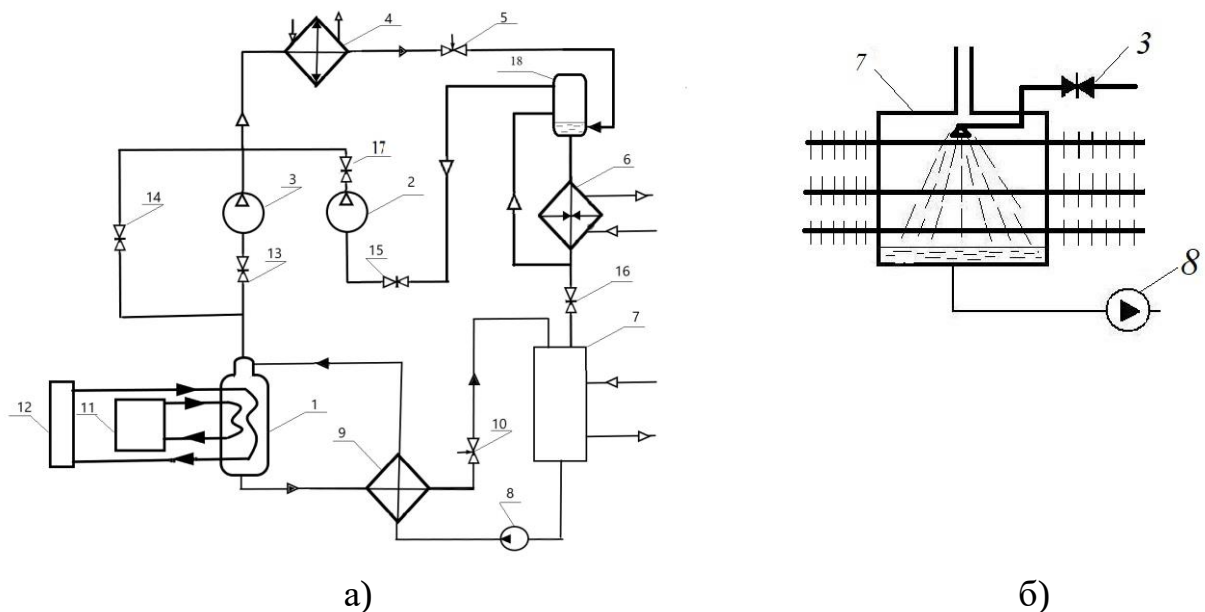


Рис.7. Комбінована компресорно-абсорбційна водоаміачна холодильна машина з електричними, скидними і сонячними джерелами енергії: а) схема; б) повітряний абсорбер; 1- генератор пара аміаку; 2- основний компресор; 3- бустер-компресор; 4- повітряний конденсатор; 5- дросель рідкого аміаку; 6- випарник-повітроохолоджувач; 7- повітряний абсорбер; 8- циркуляційний насос міцного розчину; 9-теплообмінник міцного і слабого розчину; 10- дросель слабого розчину; 11, 12 - джерела теплової енергії, відповідно, скидної і сонця; 14-17 засувки; 18 – відділювач рідини

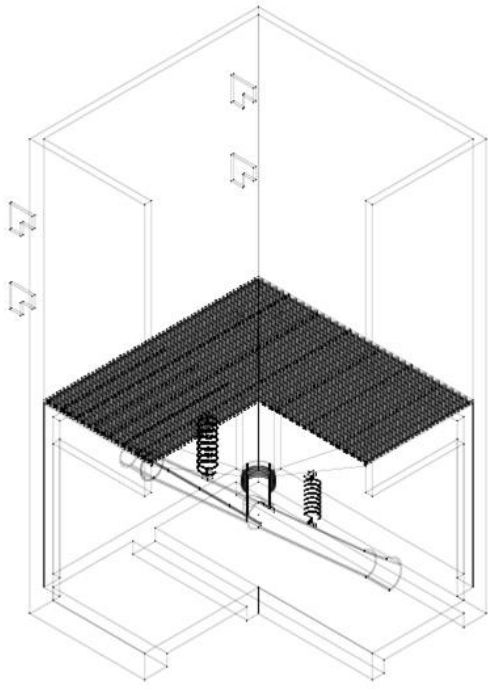


Рис. 8. Загальний вигляд контейнера

поділу руху повітря по всій площі днища контейнера. На бічній стороні передбачений люк для автоматичного вивантаження зерна в машину за допомогою електронавантажувача при перевезенні зерна. До днища контейнера приєднаний нерухомо розподільник повітря у вигляді конуса. До нього, в свою чергу, на шарнірах (пружинах) і за допомогою рухомого з'єднання підключений повітропровід. У бічних стінках контейнера передбачені напрямні для щільного прилягання до контейнеру, що стоїть поруч. При цьому конструкція муфти дозволяє виробляти автоматичне з'єднання повітропроводів один з одним при установці наступного контейнера, що стоїть поруч.

Одночасно з цим запропонована схема комбінованої холодильної машини задовольняє всім екологічним вимогам і в своїй роботі, за рахунок скидних та альтернативних джерел енергії, використовує мінімальну кількість електричної енергії протягом кліматичного календарного року

На рис. 8 зображено контейнер, який представляє собою короб з повітронепроникними зовнішніми огороженнями без верхньої кришки та з перфорованим днищем. На днище укладається дрібна тканина металева сітка з нержавіючого дроту, яка запобігає просипку дрібнонасінного зерна і сприяє рівномірному роз-

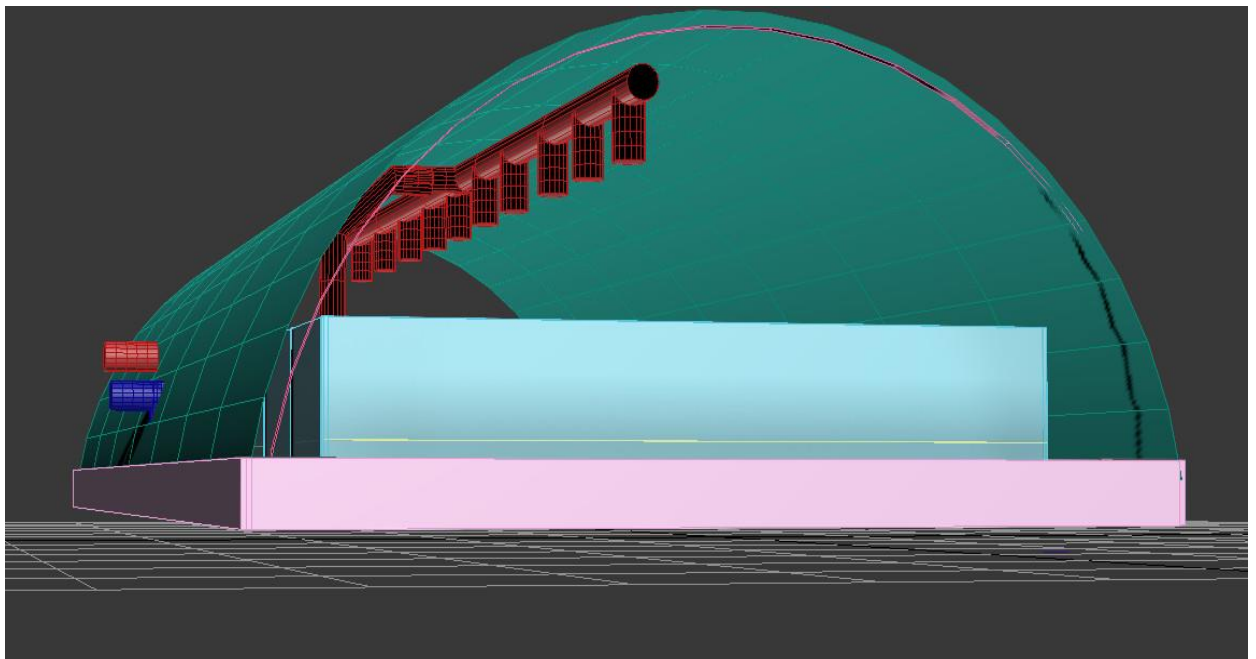


Рис.9. Загальний вигляд складу

Система охолодження складу для підлогового зберігання вологого зерна дрібнонасінневих культур приведена на рис.9.

Сховище являє собою герметичний металевий безкаркасний ангар з оцинкованої сталі на стрічковому (армованому) фундаменті. З торцевих сторін сховища розташовуються розсувні або розпашні ворота. Стіни ангара з внутрішньої сторони покриті теплоізоляцією методом наплення пінополіуретану (ППУ). Завдяки високій адгезії цього теплоізоляційного матеріалу технологія наплення дозволяє наносити його товщиною від 30 до 200 мм на стіни, стелі та інші конструкції з бетону, цегли, металу, шиферу, черепиці, дерева, пластика, що знаходяться в будь-якому просторовому положенні. Висота підлоги розташована вище нульової позначки для захисту від попадання зливових вод.

Розрахунок теплового навантаження на систему охолодження виконано з урахуванням особливостей роботи складських приміщень для тривалого зберігання зерна. Враховувати будемо тільки теплові притоки через огорожувальні конструкції (Q_1), від теплих продуктів (Q_2) і від дихання продуктів (Q_3):

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (10)$$

Для пошуку мінімуму енергоспоживання використовуємо метод рівності темпів зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна.

Для наших вихідних даних виконано такий розрахунок і побудовані графіки залежностей (рис.10).

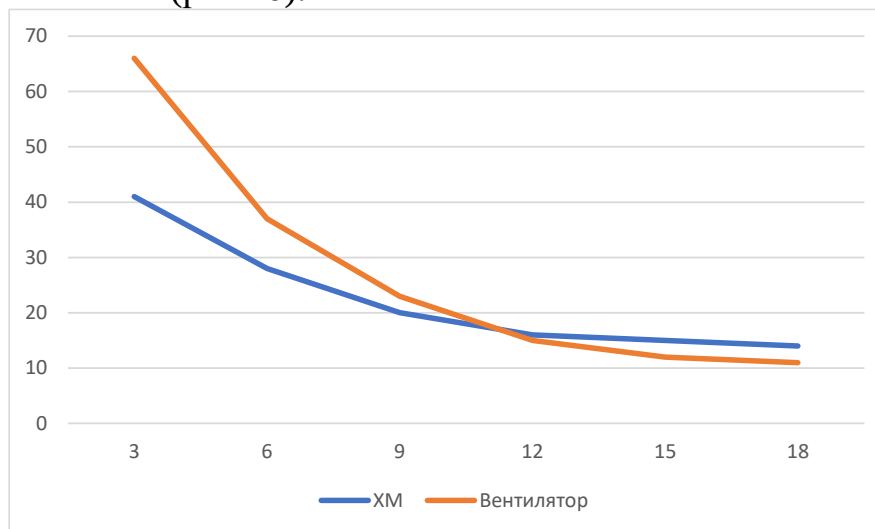


Рис.10. Зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна

За розрахунком на графіку 10 мінімальні витрати електричної потужності будуть відповідати періоду первинного охолодження ріпаку 11,5 доби.

Варто зазначити, що цей термін дає можливість зберегти якість дрібнонасінневого зерна та не погіршити його початкові характеристики.

Проведена оцінка перспективної осушувальної можливості запропонованого способу поетапного охолодження контейнерів з ріпаком за час зберігання. Тепловологісні розрахунки показали, що задана температура 9 °C гарантована буде досягнута за 8 проходів (12 діб) потоку охолодженого повітря через 1 контейнер з ріпаком. За цей час початкова вологість ріпаку буде зменшена з 16 % до 8,6 %. Ця величина відповідає рівноважній вологості ріпаку з повітрям при температурі 9 °C і відносній вологості повітря 40 %. При

таких параметрах ріпак не вимагає подальшої термічної обробки і може зберігатися до наступної посівної компанії.

Таким чином з урахуванням теоретичних і експериментальних досліджень були розроблені схеми і елементи конструкції систем первинної холодильної обробки зерна, які маючи екологічною безпекою при мінімальному споживанні електричної енергії дозволяють якісно зберігати зерно протягом календарного року.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі були розроблені, теоретично і експериментально обґрунтовані інноваційні системи охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіненних культур, які дозволяють зберігати високу якість зернового продукту з мінімальними витратами енергії при роботі холодильної машини і системи повітрообміну.

Відповідно до цього були вирішені поставлені завдання і отримані наступні результати, які дозволяють підвищити збереження урожаю при мінімальних енергозатратах:

1. Виконано аналіз сучасного стану питання розробок і досліджень систем низькотемпературної обробки та зберігання зернових продуктів. Показана перспективність створення комплексів первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіненних культур безпосередньо в місцях його заготовок. Рекомендовано використовувати біогаз для роботи охолоджувальних комплексів і аміачні холодильні машини.

2. Математична модель процесів тепломасообміну в умовах низькотемпературної обробки та зберігання зернових продуктів враховує виникнення рівноважного стану по висоті оброблюваного шару зерна і припинення процесу зневоднення зерна за рахунок контролю тепловологого стану повітря.

3. Розроблена на основі математичного моделювання та результатів експериментальних досліджень інженерна методика дозволила рекомендувати розробникам базову конструкцію контейнера кубічної форми з нижнім підведенням холодного повітря.

4. Оцінка теплогідралічних режимів низькотемпературного охолодження дрібнонасіненого зерна в широкому діапазоні інтенсивності зовнішнього теплообміну ($\alpha = 0,8 \dots 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) довела, що основний термічний опір процесу приходить на теплопровідність. Це положення дозволяє рекомендувати розробникам використовувати низьконапірні бюджетні вентилятори для системи повітрообміну.

5. З урахуванням результатів порівняльного еколого-енергетичного аналізу ПКХМ з робочими тілами R134a, R404a, R407, R410, R507, R717, а також можливості працювати в режимі повітряного охолодження теплорозсіваючих елементів, рекомендуються для роботи в якості стаціонарних холодильних установок при наявності дешевих власних або альтернативних відновлених джерел теплової енергії в сільських господарствах аміачні ПКХМ та АВХМ.

6. Проведені експериментальні дослідження процесів конвективного теплообміну при продувці нерухомого шару ріпаку показали, що охолодження ріпаку до температури 9°C супроводжується частковим його осушенням (1,13 %), що

дозволяє за час низькотемпературної обробки і зберігання довести тепловологі параметри зерна до рівноважних, з відповідним збільшенням терміну якісного зберігання (до 1 року).

8.Збільшення терміну якісного зберігання зерна до 1 року дозволяє фермерському господарству отримати економічний ефект від різниці закупівельних цін. Різниця закупівельних цін в період збору врожаю і посівної компанії, наприклад, для ріпаку в минулому році становить 240 доларів США за кожну тону.

9.Аналітичні дослідження довели, що при збільшенні швидкості повітряного потоку в досліджуваному діапазоні параметрів в 4 рази інтенсивність процесів тепломасообміну збільшується в 2 рази і одночасно збільшує в 19,6 раз потужність циркуляційного вентилятора. Така ситуація передбачає пошук мінімуму енергоспоживання при роботі системи повітрообміну і холодильної машини. Для пошуку мінімуму сумарного електроспоживання рекомендується метод рівності темпів зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна.

10.Запропонований енергозберігаючий алгоритм роботи системи охолодження з поетапної продувкою холодним повітрям кожного ряду контейнерного поля дозволяє в максимальній мірі мінімізувати сумарні енерговитрати в системі охолодження за рахунок вкладу системи повітрообміну.

11.Комбінована компресійне-абсорбційна водоаміачна холодильна машина дозволяє відмовитися від використання мережевих електричних джерел протягом 7 місяців на рік. Така холодильна машина може бути виконана в транспортному автономному виконанні і вирішувати завдання кондиціонування повітря в польових умовах. Для адаптації до польових умов абсорбер АВХМ виконаний з двофазними термосифонами і з повітряним відводом тепла в навколишнє середовище.

12.Запропоновано дві базові конструкції систем повітряного охолодження зерна - контейнерного і підлогового типу. Обидві системи можуть вирішувати завдання первинної холодильної обробки зернової продукції і вибір будь-якої системи залежить від конкретних умов фермерського господарства: обсягу продукції, місця розташування сховища, логістики.

13.Розрахунок економічних показників розробки типового фермерського господарства з урахуванням сформованих на 2021 рік ринкових цін на роботи, обладнання та комплектуючі матеріали показав, що окупність проекту складе 4,9 року при будівництві з "нульового" циклу і 4,4 року - при наявності вже існуючих будівель.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1.Петушенко С.Н., Титлов А.С. Разработка систем охлаждения для первичной низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосеменных культур. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. ISSN 1729-3774. 2015. № 3/8 (75). С. 50-56. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44251. Scopus.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтований новий підхід до конструювання систем охолодження для первинної низькотемпературної оброб-

ки та зберігання зерна дрібнонасінних культур, підготовлені матеріали до публікації.

2.Станкевич Г.Н., Овсянникова Л.К., Кудашев С.Н., Петушенко С.Н. Анализ перспектив применения холода для хранения зерна. Наукові праці ОНАХТ. 2009. Вип.35. Т.1. С.49-53.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування штучно охолодженого повітря для зберігання зерна дрібнонасінних культур, підготовлені матеріали до публікації.

3.Тітлов О.С., Петушенко С.М., Кудашев С.М. Розробка охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл. Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць. (Донецьк, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського). Донецьк. ДонНУЕТ. 2010. Випуск 24. С. 200–206.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування охолоджувальних комплексів на основі екологічно безпечних робочих тіл та підготовлені матеріали до публікації.

4.Тітлов О.С., Петушенко С.М., Кудашев С.М. Розробка мобільного охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл. Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. Одеса. 2010. Випуск 55. С. 155-161.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування мобільного охолоджувального комплексу та підготовлені матеріали до публікації.

5.Тітлов О.С., Петушенко С.М., Кудашев С.М. Розробка охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл.

Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Випуск 8. 2011. С. 26-31.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування охолоджувальних комплексів на основі екологічно безпечних робочих тіл та підготовлені матеріали до публікації.

6.Петушенко С.Н. Экспериментальные исследования режимов низкотемпературной обработки зерна мелкосеменных культур. Наукові праці ОНАХТ. 2011. Вип. 39. Т.1. С. 280-284.

7.Петушенко С.Н. Современное состояние техники и технологии низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосеменных культур. Холодильна техніка і технологія. 2013. №2. С.71-74.

8.Петушенко С.Н. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена при первичной холодильной обработке зерна мелкосеменных культур. Холодильна техніка і технологія. 2013. №3. С. 64-68.

9.Тітлов О.С., Петушенко С.М., Кудашев С.М. Розробка охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл. Молочное дело. 2011. № 1. С. 18-20.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування охолоджувальних комплексів на основі екологічно безпечних робочих тіл та підготовлені матеріали до публікації.

10. Петушенко С.Н., Титлов А.С. Экспериментальные исследования режимов низкотемпературной обработки зерна мелкозерных культур. Хлебопекарское и кондитерское дело. 2013. № 1. С.24-26.

Особистий внесок автора: розробка і створення експериментального стенду розроблена методика експериментальних досліджень, виконаний комплекс досліджень, проведений аналіз результатів, підготовлено матеріали до публікації.

11. Петушенко С.М. Титлов О.С. Системи охолодження вологого зерна дрібнонасіневих культур. Збірник робіт наукових установ Одеського регіону учасників інноваційних проектів у 2015 році. Одеса. Вип. 1. 2015. С.52-53.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування систем охолодження вологого зерна дрібнонасіневих культур та підготовлені матеріали до публікації.

12. Титлов О., Петушенко С., Сухенко В., Василів В. Охолоджувальні комплекси зерна на основі екологічно безпечних робочих тіл. Тваринництво України. 2017. № 3-4. С. 6-10.

Особистий внесок автора: проведений аналіз, обґрунтовано застосування охолоджувальних комплексів на основі екологічно безпечних робочих тіл та підготовлені матеріали до публікації.

АНОТАЦІЯ

Петушенко С.М. Розробка систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіневих культур - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». - Одеська національна академія харчових технологій, Міністерство освіти та науки України, Одеса, 2021.

Робота присвячена розробці технічних засобів для первинної низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна.

Удосконалена математична модель процесів охолодження в умовах низькотемпературної обробки та зберігання зернових продуктів. Доведено, що основний термічний опір процесу охолодження дрібнонасіневого зерна приходить на теплопровідність.

З урахуванням результатів порівняльного еколого-енергетичного аналізу парокомпресійних холодильних машин (ПКХМ) з різними робочими тілами рекомендовані аміачні ПКХМ та абсорбційні водоаміачні холодильні машини (АВХМ) для роботи в якості стаціонарних холодильних установок.

Розроблені системи первинної низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна на базі комбінованої компресійно-абсорбційної водоаміачної холодильної машини. Розроблено абсорбер АВХМ з двофазними термосифонами і з повітряним відводом тепла в навколишнє середовище. Запропоновано дві конструкції системи повітряного охолодження зерна - контейнерного і підлогового типу.

Розроблено алгоритм поетапної подачі холодного повітряного потоку по рядам контейнерів. Для пошуку мінімуму сумарного електроспоживання був ви-

користаний метод рівності темпів зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна.

Показано, що в процесі низькотемпературної обробки дрібнонасіннєвого зерна можна провести його одночасне зневоднення.

Ключові слова: *первинна обробка, низькотемпературне зберігання, тепломасообмін зерна, дрібнонасіннєве зерно, компресійні холодильні машини, абсорбційні холодильні машини, альтернативні джерела енергії, енергозбереження*

ABSTRACT

Petushenko S.M. Development of cooling systems for primary low-temperature processing and storage of grain of small-seeded crops. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the Candidate degree in Technical Science on the specialty 05.05.14 «Refrigeration, vacuum and compressor technology, air conditioning systems». - Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2021.

The work is devoted to the development of technical means for primary low-temperature processing and storage of small-seeded grains.

Improved mathematical model of cooling processes in conditions of low-temperature processing and storage of grain products. It is proved that the main thermal resistance of the cooling process of small-seeded grains falls on thermal conductivity.

Taking into account the results of a comparative environmental and energy analysis, ammonia vapor compression and absorption ammonia water refrigerating machines (AWRM) are recommended for operation as stationary refrigeration units for primary grain cooling systems.

Systems of primary low-temperature processing and storage of small-seeded grain on the basis of a combined compression-absorption ammonia-water refrigeration machine have been developed. An absorber AWRM with two-phase thermosyphons and with air removal of heat into the environment has been developed. Two designs of the grain air cooling system are proposed - container and floor type.

An algorithm has been developed for the phased supply of cold air flow through the rows of containers. To search for the minimum total power consumption, the method of equality of the rate of change in the electrical power on the fan and compressor, depending on the time of grain cooling, was used.

It is shown that in the process of low-temperature processing of small-seeded grain, it is possible to simultaneously dehydrate it.

Key words: *primary processing, low-temperature storage, heat and mass transfer of grain, small-seeded grain, compression refrigeration machines, absorption refrigeration machines, alternative energy sources, energy saving*