

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.565.3:664.723

Розробка систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіньєвих культур

С. М. Петушенко¹, О. С. Тітлов²✉¹Одеський технічний фаховий коледж ОНТУ, вул. Балківська, 54, Одеса, 65006, Україна;²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: titlov1959@gmail.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-8396-1701>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1908-5713>

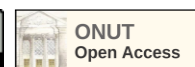
У роботі розроблено системи первинної низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіньєвого зерна на базі комбінованої компресійно-абсорбційної водоаміачної холодильної машини (АВХМ). Розроблено абсорбер АВХМ з двофазними термосифонами і з повітряним відводом тепла в навколишнє середовище. Запропонований енергозберігаючий алгоритм роботи системи охолодження з поетапною продувкою холодним повітрям кожного ряду контейнерного поля дозволяє в максимальній мірі мінімізувати сумарні енерговитрати в системі охолодження за рахунок вкладу системи повітрообміну. Комбінована АВХМ дозволяє відмовитись 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. Запропоновано дві конструкції системи 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. Розроблено алгоритм поетапної подачі холодного повітряного потоку по рядах контейнерів. Для пошуку мінімуму сумарного електроспоживання був використаний метод рівності темпів зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна. Показано, що в процесі низькотемпературної обробки дрібнонасіньєвого зерна можна провести його одночасне зневоднення. 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 посівною компанією, наприклад, для ріпаку в минулому році становить 240 \$/тон. Розрахунок економічних показників розробки типового фермерського господарства з урахування 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.

Ключові слова: Первинна обробка; Низькотемпературне зберігання; Дрібнонасіньєве зерно; Компресійні холодильні машини; Абсорбційні холодильні машини; Альтернативні джерела енергії; Енергозбереження

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2661>

© The Author(s) 2023. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

У сучасному світі все більш затребуваними стають системи холодильної техніки, зокрема, си-

стеми безперервного холодильного ланцюга, без яких не можна в повній мірі забезпечити продовольчу безпеку. Особливий інтерес має місце до систем штучного охолодження в зерновому господар-

стві 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, 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 охолодженим 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 дрібнонасінневого зерна охолодженим і висушеним 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 дрібнонасінневого зерна, в якій враховуються особливості процесів тепломасообміну між зерном і охолодженим повітрям і мінімізуються енерговитрати при виробництві штучного холоду.

Гарна сипучість зерна дає змогу зберігати його декількома способами. Найпоширеніший спосіб зберігання насипом – підлогове. У закромні сховища складують насіннєве зерно. В мішках обов'язково зберігають елітарне насіння та насіння першої репродукції. Можливе зберігання в мішках зерна, яке містить ефірні масла дрібнонасінневих культур та культур з тендітною оболонкою або з оболонкою, що легко розтріскується при пересиханні.

Для поліпшення зберігання дрібнонасінневих культур зерна є створення сучасних сховищ. Для досягнення цієї цілі пропонується дві схеми систем первинного охолодження зерна – контейнерного (мобільного) та стаціонарного типу.

2. Схеми і конструкції систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур

До складу систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур входять огорожувальні приміщення з повітроводами подачі і відведення повітря і холодильні машини, що забезпечують охолодження повітряного потоку до необхідної температури.

Розглянемо різні перспективні схеми і конструкції систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасінневих культур.

На рис. 1 представлена схема охолодження зерна за допомогою парокompресійної аміачної холодильної машини (ПКХМ).

Мобільна холодильна машина підключається за допомогою гнучких шлангів до об'єкта охолодження – зерна дрібнонасінневих культур. Контур системи замкнений і повітря після проходження через масу зерна подається на випарник, де відбувається його охолодження, а також волога випадає на теплообмінній поверхні повітроохолоджувача. Далі термооброблене повітря знову надходить на охолодження дрібнонасінневого зерна.

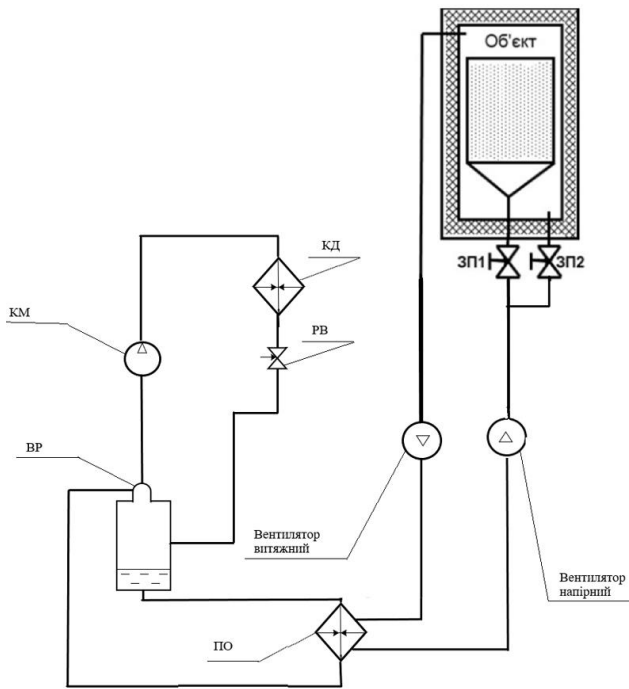


Рисунок 1 – Схема охолодження зерна за допомогою парокомпресійної холодильної машини: КМ – компресор; КД – конденсатор; РВ – регулюючий вентиль; ПО – випарник; Об'єкт – зерно, що охолоджується

На рис. 2 представлена схема охолодження зерна за допомогою абсорбційної водоаміачної холодильної машини (АВХМ).

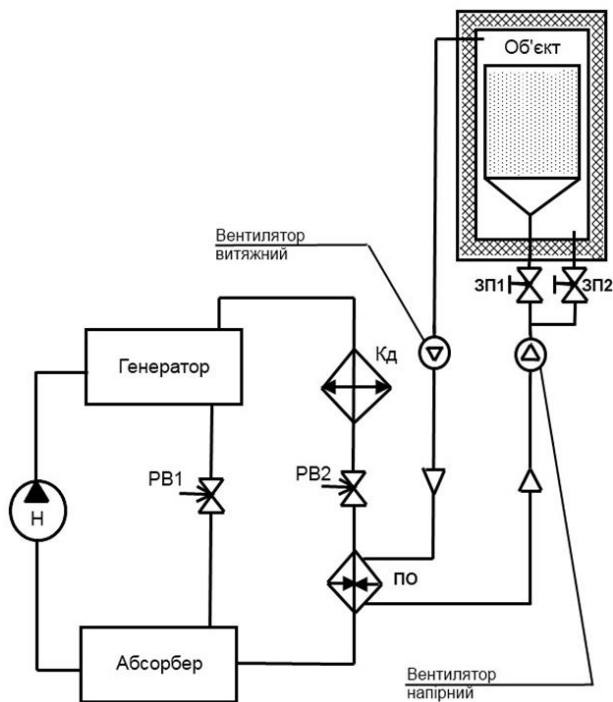


Рисунок 2 – Схема охолодження зерна за допомогою абсорбційної водоаміачної холодильної машини: Н – насос; РВ1, РВ2 – регулюючі вентиля; КД – конденсатор; ПО – випарник; Об'єкт – зерно, що охолоджується.

АВХМ можна використовувати в якості стаціонарних холодильних установок для термообробки дрібнонасіневих культур зерна. Охолодження повітря також відбувається по замкнутому циклу – це дає економію енерговитрат при термообробці повітря.

З урахуванням аналізу результатів моделювання і експериментального дослідження процесів тепломасообміну при низькотемпературній обробці дрібнонасіневого зерна [1-8] розроблено перспективну схему комбінованої холодильної машини для первинної низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна.

При розробці схеми враховувалися вимоги екологічної безпеки і мінімізації енергетичних витрат. Розглянута можливість використання альтернативних відновлювальних джерел – біогазу та сонячного теплового випромінювання.

Принципова схема холодильної машини для первинної низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна приведена на рис. 3.

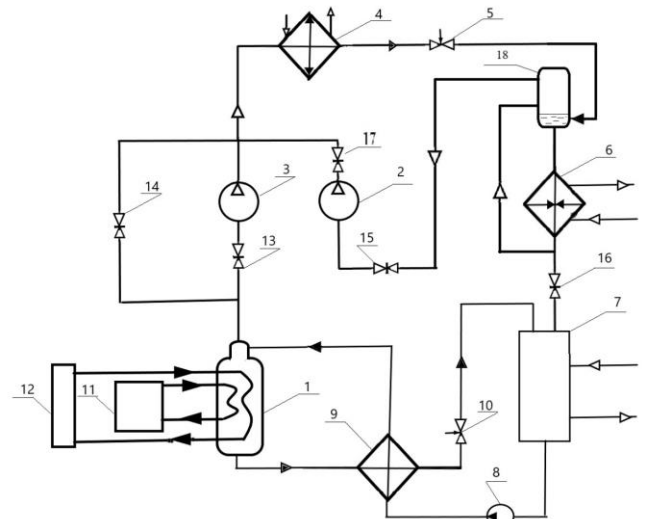


Рисунок 3 – Схема комбінованої компресорно-абсорбційної водоаміачної холодильної машини з електричними, скидними і сонячними джерелами енергії: 1 – генератор пари аміаку; 2 – основний компресор; 3 – бустер-компресор; 4 – повітряний конденсатор; 5 – дросель рідкого аміаку; 6 – випарник-повітроохолоджувач; 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 – відокремлювач рідини

З урахуванням особливостей режимів низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна та еколого-енергетичних вимог, про-

понується холодильну машину виконати в комбінованому вигляді, яка складається з парокompresійного ПКХМ блоку і блоку АВХМ.

Розглянемо роботу такої машини компресорно-абсорбційного типу в режимах низькотемпературної обробки і зберігання дрібнонасіневого зерна. Робочим тілом в циклі ПКХМ є аміак, а в циклі АВХМ – водоаміачний розчин (ВАР). У всіх випадках робоче тіло – природний компонент, що не завдає шкоди екології планети.

ВАР заправляють в генератор пари аміаку 1. Кількість і склад ВАР підбирають з розрахунку того, що частина аміаку в рідкій фазі буде постійно перебувати у відокремлювачі рідини 18.

Для переміщення аміаку у відокремлювач рідини 17 запускають в роботу АВХМ шляхом підведення тепла до генератора 1 від скидного або альтернативного джерела енергії, відповідно 11 і 12. При запуску АВХМ на викидних джерелах відкриті засувки 14, 16, а 13, 15, 17 – закриті.

На сонячному джерелі тепла відкриті засувки 13 і 16, а 14, 15 і 17 – закриті.

Робота генератора 1 АВХМ в обох випадках буде проходити до заповнення відокремлювача рідини 18 рідким аміаком.

Режим I – завантаження зерна при температурі навколишнього середовища.

У цьому випадку потрібна максимальна холодопродуктивність системи охолодження і для цього підключається блок ПКХМ.

При подачі електричної енергії на основний компресор 2 починається відкачка парів аміаку з випарника 6 і нагнітання його в повітряний конденсатор 4. У конденсаторі 4 пари аміаку зріджуються і через дросель 5 направляються в нижню частину відокремлювача рідини 18 (під рівень рідкого аміаку). З відокремлювача рідини 18 аміак надходить у випарник 6, де кипить при низькому тиску і температурі, забезпечуючи виробництво штучного холоду. Тиск в випарнику 6 підбирається з урахуванням підтримки необхідної температури об'єкта охолодження – дрібнонасіневого зерна.

Випарник 6 виконаний у вигляді повітроохолоджувача. Повітряний вентилятор підбирається з розрахунку подачі необхідної кількості охолодженого повітря і напору на подолання місцевих опорів трубопровідної арматури і шару оброблюваного зерна.

При досягненні необхідної температури зерна основний компресор 2 відключають і холодильну машину переводять в режим II – зберігання зерна.

У режимі зберігання основний компресор 2 відсікають від системи за допомогою засувки 15 і 17 і за допомогою засувки 16 підключають абсорбер 7 АВХМ.

У генератор 1 АВХМ подається теплове навантаження від скидного 11 або сонячного 12 джерела тепла. У першому випадку засувка 14 відкрита, а 13 – закриті.

У генераторі 1 при підведенні теплового навантаження ВАР кипить з переважним утворенням суміші пару аміаку і води. Парова суміш, проходячи через дефлегматор або ректифікатор (на рис. 3 не показані), очищається від парів води і чистий аміак надходить в повітряний конденсатор 4, де стискається з відведенням теплоти пароутворення в навколишнє середовище. Рідкий аміак через дросель 5 надходить у відокремлювач рідини 18 і далі у випарник-повітроохолоджувач 6. З випарника 6 пара аміаку надходить у повітряний абсорбер 7. У абсорбер 7 з генератора 1 за рахунок протидії тиску через регенеративний теплообмінник 9 і дросель 10 надходить збіднений за аміаком слабкий ВАР. Слабкий і частково охолоджений ВАР активно поглинає пару аміаку з випарника, підтримуючи при цьому зниження тиску і температури. Відведення тепла фазового переходу і абсорбції здійснюється за рахунок повітряного охолодження атмосферним повітрям.

При насиченні аміаком «слабкий» ВАР стає «міцним», насиченим і за допомогою циркуляційного насоса 8 через регенеративний 9 подається в верхню частину генератора 1 і цикл АВХМ повторюється.

При наявності низькопотенційних джерел теплової енергії, наприклад, сонячних колекторів з температурою 70...90 °С, необхідно підвищувати тиск в повітряному конденсаторі 4 [9].

Для цього підключається спеціальний бустер-компресор 3 засувкою 13, відсікається магістраль із засувкою 14, замість джерела скидного тепла 11 підключається сонячна колекторна система 12.

Бустер-компресор 3 подає додатково стиснену пару аміаку в повітряний конденсатор 4 і цикл АВХМ повторюється.

Для роботи АВХМ в складі комбінованої установки розроблено інноваційний абсорбер з повітряним охолодженням (рис.4).

Відведення тепла від внутрішнього обсягу абсорбера 1 здійснюється за допомогою горизонтальних двофазних термосифонів. Кожен такий термосифон має одну зону випаровування всередині

об'єму і дві зони відведення тепла (конденсації) за межами внутрішнього об'єму абсорбера. Для інтенсифікації теплообміну в зонах конденсації встановлені ребра 5. Подача слабкого ВАР в абсорбер здійснюється через дросель 3 в режимі душення через форсунку.

У нижній частині абсорбера накопичується міцний ВАР, який циркуляційним насосом 4 подається в регенеративний теплообмінник розчинів і далі в генератор АВХМ.

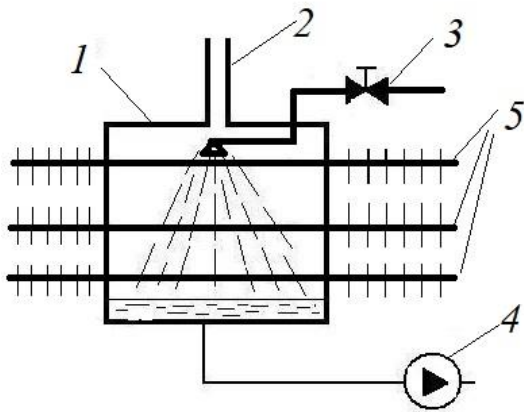


Рисунок 4 – Схема повітряного абсорбера у складі комбінованої компресорно-абсорбційної водо-аміачної холодильної машини: 1 – повітряний абсорбер; 2 – канал випарника-повітроохолоджувача; 3 – дросель слабкого розчину; 4 – циркуляційний насос міцного розчину; 5 – двофазні термосифони з ребрами у зоні конденсації (відведення тепла у навколишнє середовище)

Розташування зон випаровування в зоні душення дозволяє максимально інтенсифікувати відведення теплоти абсорбції і мінімізувати масогабаритні параметри конструкції.

Відмінною характеристикою комбінованої холодильної установки є мінімізація кількості циркулюючого аміаку: при роботі компресорної частини і абсорбційної частини використовується одна і та ж кількість аміаку.

Мінімізація кількості аміаку дозволяє знизити заходи безпеки для персоналу і заходи пожежної безпеки при експлуатації. Для її роботи не потрібно спеціальних водних джерел для відведення тепла від теплонавантажених елементів (конденсатора, абсорбера).

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

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. 5-10 зображено контейнер, який представляє собою ящик 1 з повітронепроникними зовнішніми огороженнями без верхньої кришки та з перфорованим днищем.

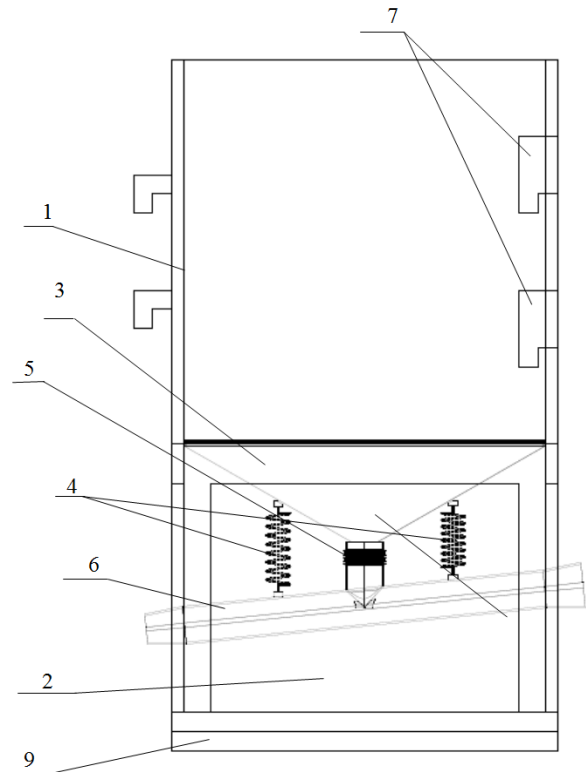


Рисунок 5 – Контейнер з повітронепроникними зовнішніми огороженнями без верхньої кришки та з перфорованим днищем.

На днище укладається дрібна тканина металева сітка з нержавіючого дроту, яка запобігає просипці дрібнонасінного зерна і сприяє рівномірному розподілу руху повітря по всій площі днища контейнера. На бічній стороні передбачений люк 2 для автоматичного вивантаження зерна в машину за допомогою електронавантажувача при перевезенні зерна. До днища контейнера приєднаний нерухомий розподільник повітря 3 у вигляді конуса. До нього, в свою чергу, на шарнірах (пружинах) 4 і за допомогою рухомого з'єднання 5 підключений повітровід 6. У бічних стінках контейнера передбачені напрямні 7 для щільного прилягання до контейнеру, що стоїть поруч. При цьому конструкція муфти 8 дозволяє виробляти автоматичне з'єднання повітропроводів один з одним при установці

наступного контейнера, що стоїть поруч. Контейнер додатково містить платформу 9, на якій він встановлений. Конструкція платформи дозволяє здійснювати переміщення контейнера за допомогою електронавантажувачів.

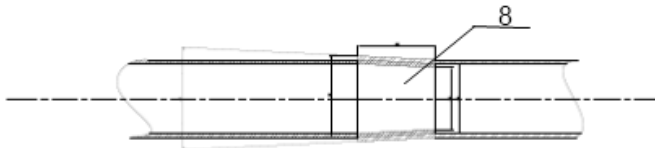


Рисунок 6 – З'єднувальна муфта контейнера

Процес здійснюється в такий спосіб. Контейнери встановлюються в складі для зберігання зерна по всій площі, утворюючи ряди із загальним повітродоводом. При цьому перший контейнер приєднується до загального розподільного повітродоводу. Кожен наступний контейнер щільно прилягає до контейнеру, що стоїть попереду, а повітродоводи

6 автоматично з'єднуються в єдину лінію. Це забезпечується направляючими 7, шарнірами (пружинами) 4 і спеціальною конструкцією муфти 8. Останній контейнер, який встановлюється в ряду, має заглушку на кінці повітродоводу. Кількість рядів контейнерів, що встановлюються, визначається розмірами складу.

Магістральний повітродовід, розташований по довжині складу, має спеціальну заслінку, яка дозволяє відключати або підключати необхідну кількість встановлених рядів контейнерів, заповнених зерною масою.

Заповнення зерном здійснюється за допомогою пневматичного навантажувача. До зовнішнього вузла виводів магістральних повітродоводів (нагнітального і всмоктуючого) підключається мобільна холодильна машина і проводиться охолодження зернової маси [10, 11].

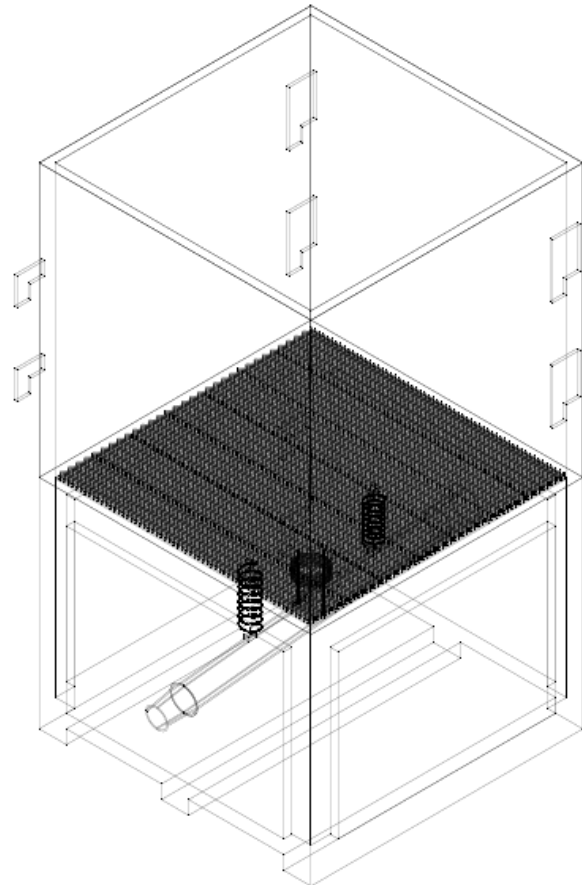
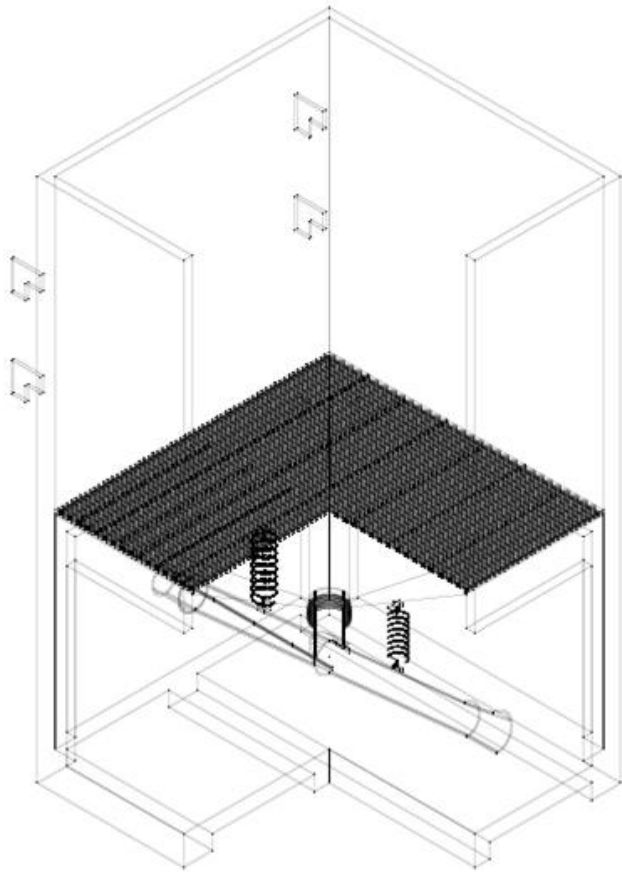


Рисунок 7 – Загальний вид контейнер

Запропоновано також систему охолодження складу для підлогового зберігання вологого зерна дрібнонасіненних культур.

Сховище являє собою герметичний металевий безкаркасний ангар з оцинкованої сталі на стрічковому (армованому) фундаменті (рис. 11). З тор-

цевих сторін сховища розташовуються розсувні ворота або інші конструкції. Стіни ангара з внутрішньої сторони покриті теплоізоляцією методом наплення пінополіуретану (ППУ). Завдяки високій адгезії цього теплоізоляційного матеріалу технологія наплення дозволяє наносити його товщи-

ною 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.

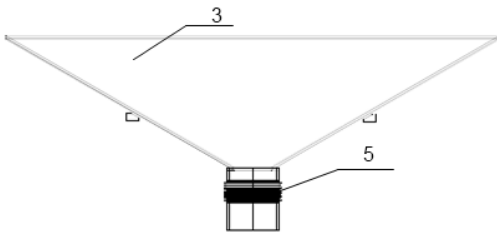


Рисунок 8 – Розподільник повітря

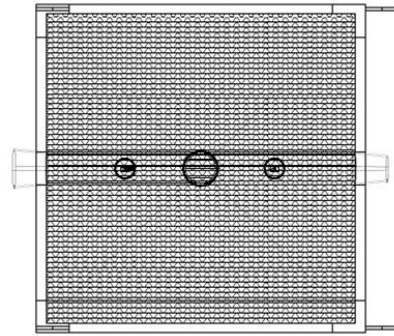


Рисунок 9 – Повітропроникна решітка

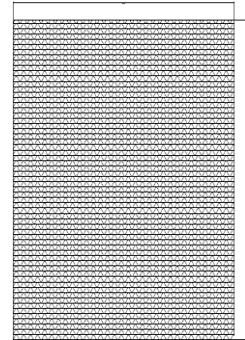


Рисунок 10 – Фрагмент ткані нержавіючої дрібноної сітки

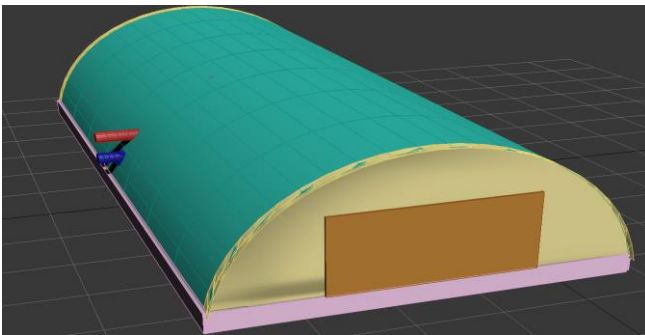


Рисунок 11 – Загальний вигляд складу

Підлога 1 складу виконана з поглибленням. Склад по довжині розділений залізобетонними герметичними перегородками 2 на автономні сектори шириною 1 м, утворюючи мережу повітряних каналів 3, при цьому відступи від бічних стін складають 0,8 - 1 м (Рис. 12).

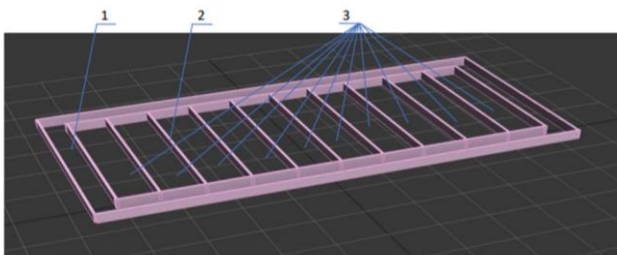


Рисунок 12 – Мережа повітряних каналів:
1 – підлога складу; 2 – залізобетонні герметичні перегородки; 3 – мережа автономних повітряних каналів

У середині кожного сектора встановлюється перфорована металева решітка 1 на ніжках 2 (рис.13). Рівень решітки вирівнює підлогу по висоті, утворюючи рівну поверхню, при цьому зберігаючи геометричні розміри повітряного каналу.

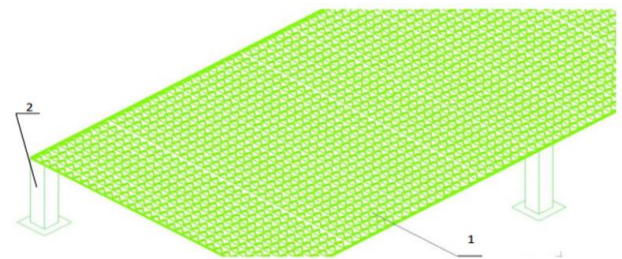


Рисунок 13 – Перфорована металева решітка

Перфорована решітка покрита тканю нержавіючої дрібноної сіткою з розміром комірки 1-1,2 мм і товщиною дроту 0,09-1,5 мм марки AISI321, AISI304, дозволеної для застосування в харчовій промисловості. Кріплення сітки до перфорованої металевої решітки здійснюється за допомогою спеціальних кріпильних пластинок обтискним методом. Дрібний розмір осередку запобігає просипання дрібнонасінного зерна і забезпечує рівномірний розподіл повітря по площі каналу (рис.14).

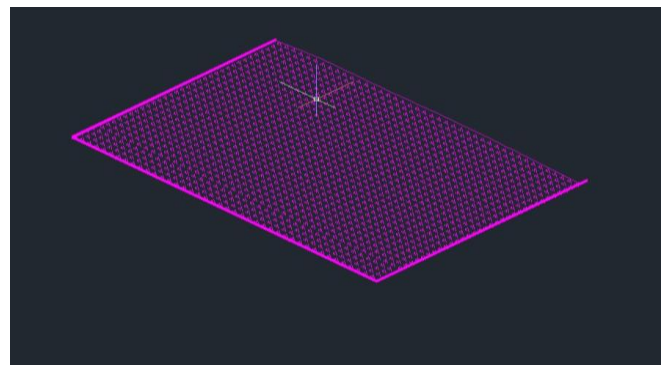


Рисунок 14 – Фрагмент ткані нержавіючої сітки

У бічному поглибленні розташований магістральний повітровід 1, що подає штучно охолоджене

не повітря по довжині складу. Кожен сектор підключений від магістрального повітроводу через спеціальну заслонку, яка дозволяє відключати або підключати необхідну кількість секторів в залежності від завантаження складу зерном (рис. 15).

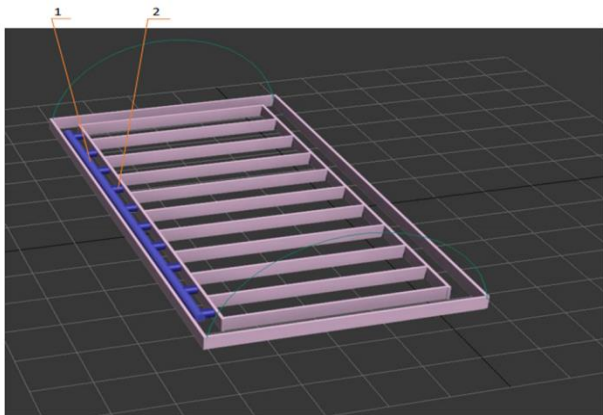


Рисунок 15 – Магістральний повітровід, що подає штучно охолоджене повітря: 1 – магістральний повітровід; 2 – місце підключення до сектору

На рис. 16 у верхній частині складу розташовується повітровід відведення відпрацьованого повітря 1 на термообробку до холодильної машини. Повітроводи, що подають 2 і відводять повітря 1, виводяться до бічної сторони складу зберігання зерна та виводяться на вулицю, утворюючи вузол 3 для підключення мобільної холодильної машини.

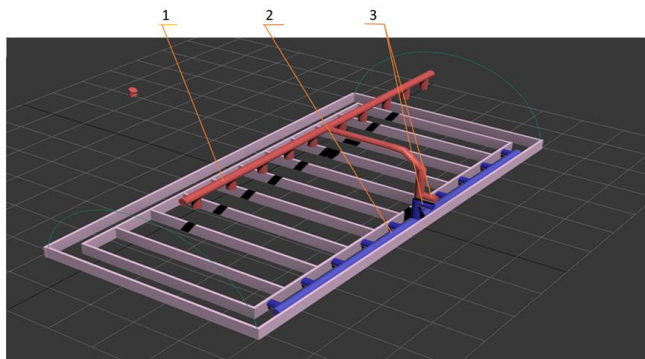


Рисунок 16 – Розташування магістральних повітропроводів, що подають і відводять повітря: 1 – повітровід відведення відпрацьованого повітря; 2 – повітровід, що подає повітря; 3 – вузол для підключення мобільної холодильної машини

За допомогою знімних пластмасових панелей-перегородок 1 висотою 1м, що встановлюються по краю кожного сектора, робоча площа складу ділиться на окремі бункери 2 (рис.17).

Таке рішення дозволяє:

– підключати необхідну кількість секторів по мірі їх заповнення зерном в режим термообробки

за допомогою відкриття заслінок від магістрального повітроводу;

– зберігати зерно декількох видів в одному приміщенні;

– скорочення часу термообробки зерна за рахунок спрямування штучно охолодженого повітря в місце завантажених секторів.

Крім того, під час перевірки стану і якості зерна, в періоди охолодження і зберігання дозволить отримувати більш точні показники в кожному окремому бункері.

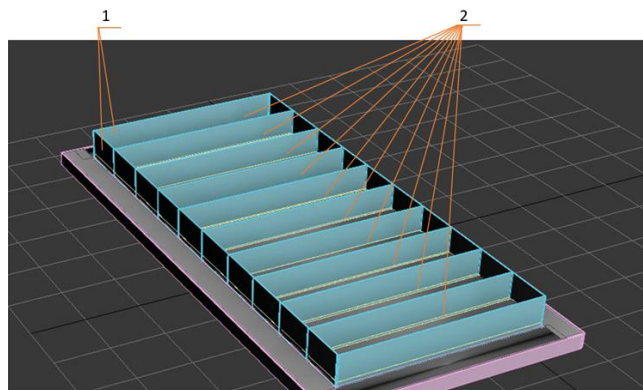


Рисунок 17 – Вид складу з встановленими панелями: 1 – знімні пластмасові панелі-перегородки; 2 – окремі бункери.

На рис. 18 представлений вид складу, заповненого зібраним зерном 1, перед його термообробкою штучно охолодженим повітрям. Заповнення здійснюється за допомогою пневмонавантажувача. Наявність двох дверей, розташованих в торцях будівлі, дозволяє зменшити час завантаження і вивантаження зерна.

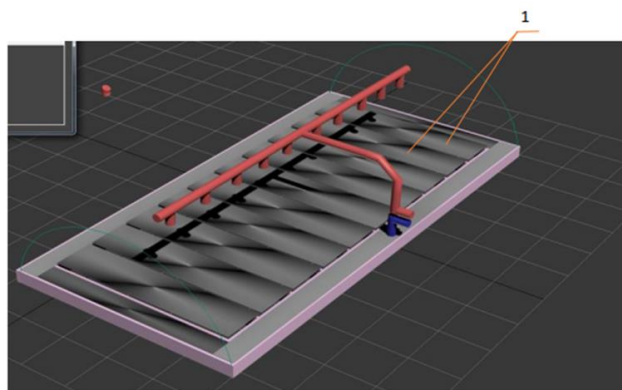


Рисунок 18 – Склад, заповнений зібраним зерном: 1 – зерно засипане в окремі бункери.

На рис.19 представлений загальний вигляд складу для низькотемпературної обробки і зберігання зерна за допомогою штучно охолодженого повітря для фермерських господарств України [1].

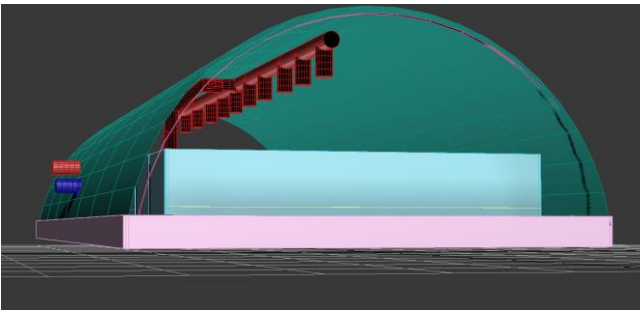


Рисунок 19 – Загальний вигляд складу

3. Розрахунок теплового навантаження та режимів роботи систем первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіньєвих культур

Розрахунок теплового навантаження на систему охолодження проведемо за відомою методикою [12]. З урахуванням особливостей роботи складських приміщень для тривалого зберігання зерна враховувати будемо тільки теплоприпливи через огорожувальні конструкції (Q_1), від теплих продуктів (Q_2) і від дихання продуктів (Q_3):

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

Розрахунок теплоприпливів у склад проводиться за стандартною методикою і схемою, наведеною у таблиці.

Таблиця – Схема розрахунку теплоприпливів у склад

Липень	1. Теплоприпливи за рахунок надходження зерна на зберігання після збирання при максимальній температурі навколишнього середовища. 2. Теплоприпливи через огорожувальні конструкції. 3. Теплоприпливи внаслідок «дихання» зерна.
Серпень Вересень Жовтень	1. Теплоприпливи через огорожувальні конструкції. 2. Теплоприпливи внаслідок «дихання» зерна.
Листопад	1. Теплоприпливи внаслідок «дихання» зерна.

Проведемо розрахунок першої складової рівняння (1).

Як показав аналіз кліматичних умов України в період з грудня по квітень календарного року гарантована температура якісного зберігання зерна може бути досягнута за рахунок вентилявання

зовнішнім повітрям.

Фермерські господарства умовно поділяються на малі (5-20 га), середні (20-100 га) і агропідприємства або великі ферми, які обробляють площу від 500 га [13].

Сховища для зберігання зернових культур в більшості своїй створюються за типовим проектом, враховуючи обсяги врожаю фермерського господарства. Так, за даними проекту «Урожай онлайн 2020» було намолочено 2,55 млн. т ріпаку з площі 1,11 млн. га (100 %) при середній врожайності 2,29 т / га.

Розглянемо приклад середнього господарства з контейнерним складуванням зерна. Для зменшення витрат на будівництво можлива переробка вже діючого насипного складу в контейнерний.

На рис. 20 наведена схема складу зберігання дрібнонасіньєвого зерна – ріпаку в контейнерах. Розмір складу (дов×шир×вис) – 20×20×6 м.

Склад 1 виконаний у вигляді ангара. У торцевих стінах виконані ворота 2 для завантаження і вивантаження контейнерів з зерном 3.

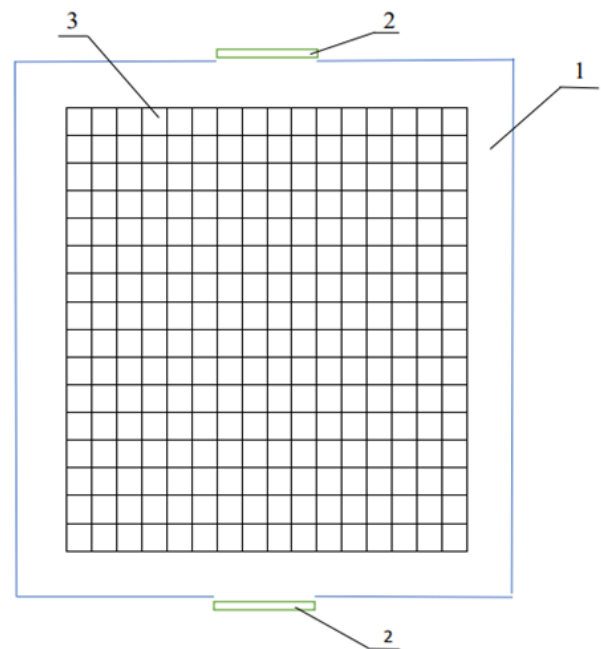


Рисунок 20 – Схема складу зберігання дрібнонасіньєвого зерна в контейнерах: 1 – склад; 2 – ворота; 3 – контейнери, які встановлені в єдиний ряд

Вихідними даними крім параметрів складу для розрахунку теплоприпливів крізь огорожуючі конструкції Q_1 були кліматичні умови України [14]: середня температура в Україні по місяцях (рис. 22); середня вологість в Україні по місяцях (рис. 23).

На першому етапі були враховані теплоприпливи, викликані різницею температур зовнішнього

повітря і повітря всередині складу Q_{IT} , та теплоприпливи від сонячної радіації Q_{IC} :

$$\Sigma Q_1 = Q_{IT} + Q_{IC} \quad (2)$$

Відступи від стін до початку ряду 2 м. Контейнери встановлюються в ряди 3, впритул один до одного, утворюючи єдиний повітровід і підключаються до напірного повітроводу.

Місткість зерна ріпаку – 180 т, що відповідає збору врожаю для середнього фермерського господарства. Внутрішню поверхню утеплюємо за допомогою напилення пінополіуретану з товщиною 100 мм.

На рис.21 наведена схема повітропроводів у контейнерному складі.

На напірному повітроводі 2 встановлені заглушки 4, які дозволяють підключати / відключати необхідну кількість рядів з контейнерами.

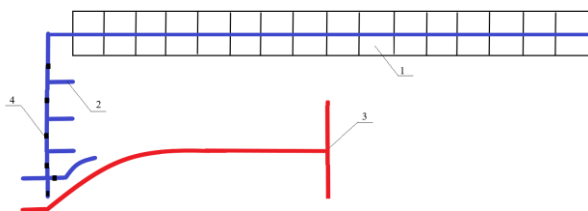


Рисунок 21 – Схема повітропроводів у контейнерному складі: 1 – контейнери, які встановлені в єдиний ряд; 2 – напірний повітровід (місце підключення наступного ряду контейнерів); 3 – відвідний повітровід; 4 – заглушка, що дозволяє підключати / відключати необхідну кількість рядів

Така конструкція дозволяє зберігати дрібнонасінене зерно декількох видів в одному складі (наприклад насінневе) і підключати до охолодження різні партії зерна в разі зсуву прибирання його за часом.

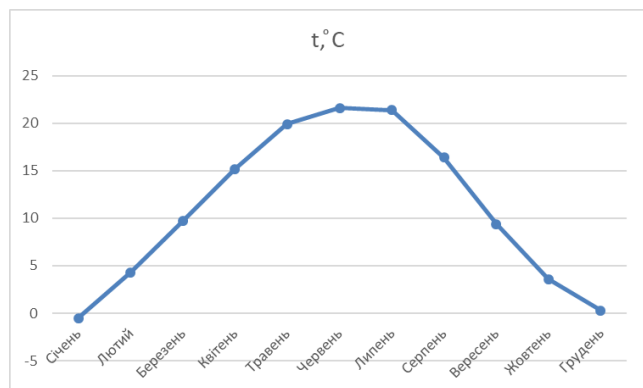


Рисунок 22 – Середня температура повітря в Україні по місяцях

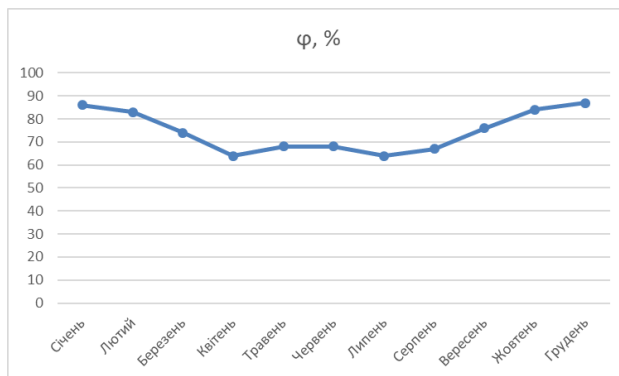


Рисунок 23 – Середня вологість повітря в Україні по місяцях

Результати розрахунку теплоприпливів крізь огорожуючі конструкції Q_1 представлені на рис. 24.

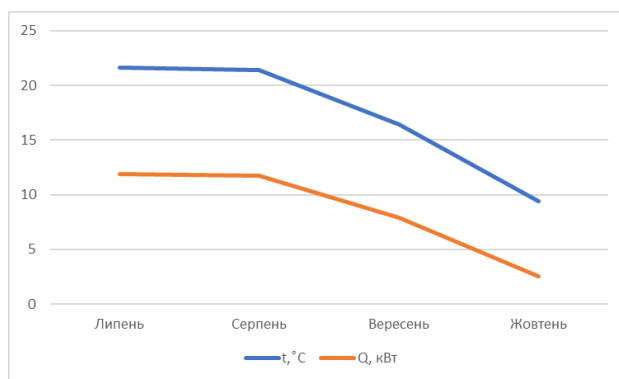


Рисунок 24 – Середня температура повітря (t) в Україні та теплоприпливи крізь огорожуючі конструкції (Q_1) по місяцях

Теплоприпливи крізь огорожуючі конструкції спорудження розраховувались згідно нормативних методик [15] і склали $Q_1 = 11887$ Вт.

Попередній розрахунок гідравлічної системи подачі охолодженого повітря з урахуванням результатів [1-8] показав, що через значний опір щільного шару ріпаку на практиці неможливо подати повітря відразу на всі ряди контейнерів за допомогою одного вентилятора. Розпаралелювання повітряних потоків і задіяння декількох вентиляторів також не дозволяє досягти прийнятних енерговитрат.

Для зниження сумарних експлуатаційних енерговитрат і базової вартості комплектуючих системи охолодження був запропонований алгоритм поетапної подачі холодного повітряного потоку по рядах контейнерів. Це дозволить вибрати холодильну машину і припливний вентилятор меншої потужності і вартості

Відповідно до схеми розташування контейнерів (рис.20) будемо здійснювати поетапну подачу

холодного повітря по рядах, що складається з 16 контейнерів.

Аналіз складових рівняння (1) показав, що сумарне теплове навантаження на випарник-повітроохолоджувач холодильної машини від часу залежить тільки в частині тривалості процесу первинного охолодження зерна. І чим менше час охолодження, тим більше потрібно витрат холоду. Залежність являє собою зворотну функцію.

Електрична потужність на приводі повітряного напірного вентилятора визначається через добуток напору та об'ємної витрати і залежить від швидкості або часу в квадратичному ступені.

Вочевидь, що існує такий період часу охолодження, при якому сумарні витрати електричної потужності на привід повітряного вентилятора і привід компресора холодильної машини будуть мінімальні.

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

Для вихідних даних виконано такий розрахунок і побудовані графіки залежностей (рис. 25).

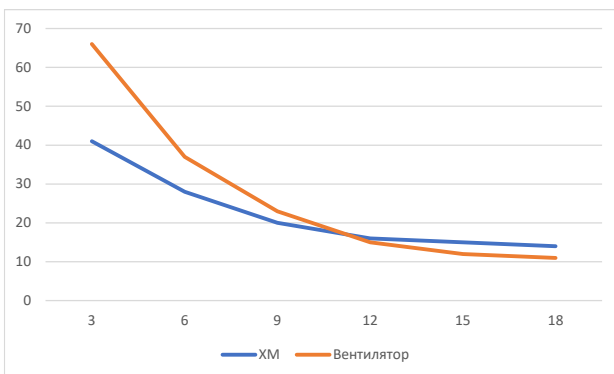


Рисунок 25 – Зміни електричних потужностей на вентиляторі і компресорі в залежності від часу охолодження зерна

За розрахунком рис. 25 мінімальні витрати електричної потужності будуть відповідати періоду первинного охолодження ріпаку 11,5 доби.

Варто зазначити, що цей термін дає можливість зберегти якість дрібнонасінного зерна та не погіршити його початкові характеристики [16].

Розрахунок показав, що при роботі за таким алгоритмом первинна необхідна холодопродуктивність компресора системи охолодження складе $Q_2 = 6522$ Вт.

Також з урахуванням технологічних даних [16] було враховано тепло, яке утворюється вна-

слідок дихання зерна ріпаку (Q_3).

На один ряд 16 контейнерів ріпака теплове навантаження на компенсацію дихання зерна ріпака складає 353 Вт.

Таким чином необхідна для компенсації теплоприпливів холодопродуктивність компресора складе $\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_0 = 18762$ Вт.

Розрахунок холодильного циклу виконується відповідно до відомих методик для аміаку в якості робочого тіла.

-Температура кипіння робочої речовини -15 °С;

-Температура конденсації 47 °С;

-Робоча речовина R717.

-Холодопродуктивність компресора $Q_0 = 18762$ Вт.

Розрахункова споживана потужність аміачного компресора 5,6 кВт.

Електричну потужність вентилятора вибираємо з розрахунку мінімальних енерговитрат.

За 1 годину роботи холодильної машини температура ріпаку в контейнері знизиться на 1 °С. Після цього повітропровід переключиться на другий ряд контейнерів, потім через 1 годину на третій ряд і так далі. Через 16 годин закінчиться повний етап охолодження на 1 °С всього контейнерного блоку і вентилятор знову переключиться на перший ряд. Перемикання триватиме до тих пір, поки температура у всіх контейнерах не досягне заданої 9 °С.

Для цього вибираємо алгоритм подачі холодного повітря окремо в часі по рядах. Всього 16 рядів по 16 контейнерів в кожному ряду. На один ряд потрібен вентилятор потужністю: $266 \times 16 = 4256$ Вт.

Діаграма необхідної холодопродуктивності та ефективної потужності електродвигуна компресора по місяцям представлена на рис. 26.

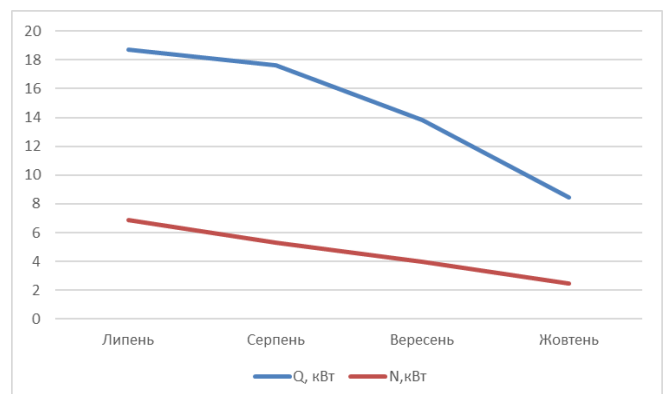


Рисунок 26 – Діаграма необхідної холодопродуктивності та ефективної потужності електродвигуна компресора по місяцям

На підставі розрахунків (рис. 26) видно, що пік навантаження припадає на липень місяць – час збирання врожаю та первинної низькотемпературної обробки зерна дрібнонасіненних культур. На цей час знадобиться максимальна робота холодильної машини. В цей час буде працювати блок ПКХМ. При наявності скидних або альтернативних джерел енергії в режимі зберігання зерна можливо використовувати АВХМ.

Як видно з діаграми середньої температури повітря в Україні по місяцях (рис. 22), починаючи з листопада місяця, залишаються тільки теплоприпливи внаслідок «дихання» зерна, які можуть компенсуватися за рахунок низької температури навколишнього середовища.

Тепловологісний процес обробки повітряного потоку в повітроохолоджувачі наведено на рис. 27

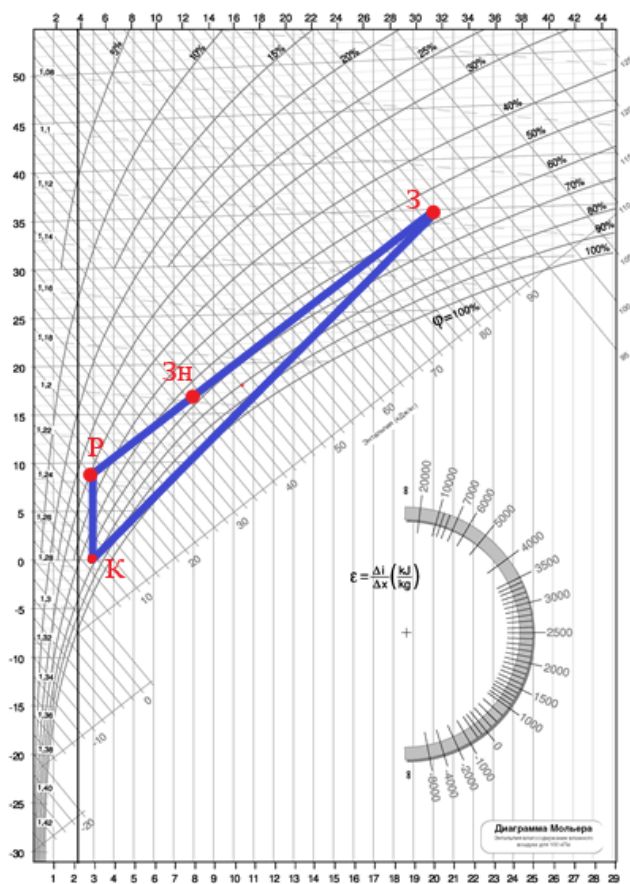


Рисунок 27 – Тепловологісний процес обробки повітряного потоку в повітроохолоджувачі

Точка З показує тепловологісний стан зовнішнього повітря. Точка К – стан повітря після обробки їх в типовому повітроохолоджувачі. Точка Р – подача повітря в контейнерах з зерном.

Для охолодження повітря в ангарі і компенсації теплоприпливів з навколишнього середовища

передбачені спеціальні витрати холоду.

Стан повітря в ангарі при зниженні його температури від початкової характеризується лінією З-Р.

Для зниження експлуатаційних енерговитрат повітряну систему виконують замкнутого типу і відбір відпрацьованого повітря на охолодження здійснюють безпосередньо з ангара.

Точка Зн – поточний стан повітряного середовища в ангарі.

Точка З на рис. 27 представляє максимальне холодильне навантаження на повітроохолоджувач. Надалі при зниженні температури повітря в ангарі початкові параметри повітря на вході повітроохолоджувача наблизяться до параметрів точки Р і, відповідно, теплове навантаження на повітроохолоджувач буде знижуватися. У прикладі на рис.27 зниження теплового навантаження складе 8,8 рази.

З урахуванням результатів експериментальних досліджень проведемо оцінку перспективної осушувальної можливості запропонованого способу поетапного охолодження контейнерів з ріпаком за час зберігання.

Для цього скористаємося рівнянням для розрахунку масової витрати при масообміні між поверхнею зерна і повітряним потоком із заданою температурою і вологовмістом

$$G = \bar{\beta} \cdot \Delta \bar{P}_n \cdot F, \text{ кг/с} \quad (3)$$

де $\bar{\beta}$ – середньоінтегральний по висоті коефіцієнт масообміну, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{Па})$; $\Delta \bar{P}_n$ – середньоінтегральна по висоті різниця парціальних тисків в процесі масопередачі, Па; F – площа контактної поверхні зерна, м^2 .

Розрахунки показали, що за один прохід холодного повітря одного ряду, що складається з 16 контейнерів з ріпаком, при зниженні початкової температури на 1°C приблизно за 1 годину початкова вологість ріпака зменшується на:

- для діапазону початкової вологості 16...12% – близько 0,5%;
- для діапазону початкової вологості 11...9% – близько 0,4%;
- для діапазону початкової вологості 8...7% – близько 0,1%.

Тепловологісні розрахунки показали, що задана температура 9°C гарантовано буде досягнута за 8 проходів (12 діб) потоку охолодженого повітря через 1 метр шару ріпаку.

За цей час початкова вологість ріпаку буде зменшена з 16 % до 8,6 %.

Ця величина відповідає рівноважній вологості ріпаку з повітрям при температурі 9 °С і відносній вологості повітря 40 % [16]. При таких параметрах ріпак не вимагає подальшої термічної обробки і може зберігатися до наступної посівної компанії.

4. Висновки

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

Комбінована компресійно-абсорбційна вододіафрагма холодительна машина дозволяє відмовитися від використання мережевих електричних джерел протягом 7 місяців на рік. Така холодительна 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.

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

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 посівною компанією, наприклад, для ріпаку в минулому році становила 240 \$/тон. Розрахунок економічних показників розробки типового фермерського господарства з урахування 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.

Особистий внесок авторів CRediT

Петушенко С.М.: перевірка, візуалізація, дослідження, програмне забезпечення, написання –

огляд та редагування. **Тітлов О.С.:** концептуалізація, методологія, формальний аналіз, написання – оригінальний проект, адміністрування.

Література

1. **Петушенко С.М., Тітлов О.С.** Розробка систем охолодження для первинної низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіневих культур // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3/8 (75). – С. 50-56.
2. **Станкевич Г.Н., Овсяннікова Л.К., Кудашев С.М., Петушенко С.М.** Аналіз перспектив застосування холоду для зберігання зерна // Наукові праці ОНАХТ. – 2009. – Вип. 35, Т.1. – С.49-53.
3. **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. – 2010. – Вип. 55. – С. 155-161.
4. **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. – 2011. – Вип. 8. – С. 26-31.
5. **Петушенко С.М.** Експериментальні дослідження режимів низькотемпературної обробки зерна дрібнонасіневих культур // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 39, Т.1. – С. 280-284.
6. **Петушенко С.М.** Сучасний стан техніки та технології низькотемпературної обробки та зберігання зерна дрібнонасіневих культур // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – №2. – С.71-74.
7. **Петушенко С.М.** Результати експериментальних досліджень процесів теплообміну при первинній холодительній обробці зерна дрібнонасіневих культур // Холодильна техніка і технологія. – 2013. – №3. – С. 64-68.
8. **Тітлов О., Петушенко С., Сухенко В., Василів В.** Охолоджувальні комплекси зерна на основі екологічно безпечних робочих тіл // Тваринництво України. – 2017. – № 3-4. – С. 6-10.
9. **Морозюк Л.І.** Тепловикористовуючі холодительні машини – шляхи розвитку та вдосконалення // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 5. – С. 23-29.
10. **Атаназевич В.І.** Сушка зерна. – М.: ДеЛі принт, 2007. – 480 с.
11. Закон «Про продовольчу безпеку України». Опубліковано 22.12.2011. URL: <https://www.rada.gov.ua/>

- gov.ua/news/Povidomlennya/ (дата звернення 21.08.23).
12. Чумак І.Г., Ларьяновський С.Ю., Парцхаладзе Е.Г. та ін. Холодильні установки для країн з тропічним кліматом. Навчальний посібник. – К. Либідь, 1992. – 224 с.
13. Фермерські господарства. URL: <https://ua.all.biz> (дата звернення 21.08.23).
14. Клімат України – ArcGIS StoryMaps. URL: <https://storymaps.arcgis.com/stories/7c1e5428b65e45>

- 14bbb266983b54832c (дата звернення 21.08.23).
15. Розрахунок теплоприпливу. URL: <https://ventportal.com/ua/node/585> (дата звернення 21.08.23).
16. Овсянникова Л.К., Соколовська О.Г., Валевська Л.О., Гришук Ю.В. Визначення факторів, що впливають на організацію процесу зберігання дрібнонасінневих олійних культур // *Зернові продукти і комбікорми*. – 2018. – Т.1, Вип. 1. – С. 23-29

Отримана в редакції 21.08.2023, прийнята до друку 18.09.2023

Development of cooling systems for primary low-temperature processing and storage of grain of small-non-seed cultures

Serhii Petushenko¹, Oleksandr Titlov^{✉2}

¹Odesa Technical Vocational College of ONTU, Balkivska str., 54, Odesa, 65006, Ukraine;

²Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: titlov1959@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-8396-1701>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1908-5713>

The work developed a system of primary low-temperature processing and storage of small-seeded grain based on a combined compression-absorption water-ammonia refrigerating machine (AWRM). An AWRM absorber with two-phase thermosiphons and air heat removal to the environment has been developed. Two designs of grain air cooling systems have been proposed – container and floor type. The proposed energy-saving algorithm for the operation of the cooling system with stage-by-stage blowing of each row of the container field with cold air makes it possible to minimize the total energy consumption in the cooling system to the maximum extent due to the contribution of the air exchange system. A combined compression-absorption water-ammonia refrigeration machine allows you to refuse to use network electrical sources for 7 months of the year. Such a refrigeration machine can be made in a transport autonomous design and solve the problem of air conditioning in field conditions. To adapt to field conditions, the AWRM absorber is made with two-phase thermosiphons and air heat removal to the environment. Two basic designs of grain air cooling systems are proposed - container and floor type. Both systems can solve the problems of primary refrigeration processing of grain products, and the choice of any system depends on the specific conditions of the farm: volume of products, storage location, logistics. An algorithm has been developed for the gradual supply of cold air flow through rows of containers. To find the minimum total power consumption, the method of equalizing the rate of change in electrical power on the fan and compressor depending on the grain cooling time was used. It has been shown that in the process of low-temperature processing of small-seeded grain it is possible to simultaneously dehydrate it. Increasing the quality storage period of grain to 1 year allows the farm to gain economic benefits from the difference in purchase prices. The difference in purchase prices during the harvesting period and the sowing company, for example, for rapeseed last year was 240 US dollars for each ton. Calculation of economic indicators for the development of a typical farm, taking into account market prices for work, equipment and component materials, showed that the payback of the project will be 4.9 years for construction according to the «zero» cycle and 4.4 years for existing buildings.

Keywords: Primary processing; Low-temperature storage; Small-seeded grain; Compression refrigeration machines; Absorption refrigeration machines; Alternative energy sources; Energy saving

References

1. Petushenko, S.M., Titlov, O.S. (2015) Development of cooling systems for primary low-temperature processing and storage of grain of small-seeded crops.

East European Journal of Advanced Technologies, 3/8 (75), 50-56.

2. Stankevich, G.N., Ovsyannikova, L.K., Kudashov, S.M., Petushenko, S.M. (2009) Analysis of prospects for the use of cold for grain storage. *Scien-*

tific works of ONAFT, 35, 1, 49-53.

3. **Titlov, O.S., Petushenko, S.M., Kudashev, S.M.** (2010) Development of a mobile cooling complex based on environmentally safe working bodies. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Region. Technical sciences, 55, 155-161.*

4. **Titlov, O.S., Petushenko, S.M., Kudashev, S.M.** (2011) Development of a cooling complex based on ecologically safe working bodies. *Collection of scientific papers of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, 8, 26-31.*

5. **Petushenko, S.M.** (2011) Experimental studies of modes of low-temperature grain processing of small-seeded crops. *Naukovi pratsi ONAFT, 39, 1, 280-284.*

6. **Petushenko, S.M.** (2013) Modern state of the art and technology of low-temperature processing and storage of grain of small-seeded crops. *Refrigeration engineering and technology, 2, 71-74.*

7. **Petushenko, S.M.** (2013) Results of experimental studies of heat exchange processes during the primary refrigerating treatment of small-seeded grains. *Refrigeration engineering and technology, 3, 64-68.*

8. **Titlov O., Petushenko, S., Sukhenko, V., Vasyliv, V.** (2017) Grain cooling complexes based on ecologically safe working bodies. *Animal Husbandry of Ukraine, 3-4, 6-10.*

9. **Morozyuk, L.I.** (2014) Heat-using refrigerating

machines – ways of development and improvement. *Refrigeration engineering and technology, 5, 23-29.*

10. **Atanazevych, V.I.** (2007) Grain drying. *M.: DeLee Print, 480.*

11. Law "On Food Security of Ukraine". Published on 12/22/2011. Retrived 21 August 2023 from <https://www.rada.gov.ua/news/Povidomlennya/>.

12. **Chumak, I.G., Laryanovskyi, S.Yu., Partskhaladze, E.G. etc.** (1992) Refrigeration units for countries with a tropical climate. Tutorial. *K. Lybid, 224.*

13. Farms. Retrived 21 August 2023 from <https://ua.all.biz>.

14. Climate of Ukraine - ArcGIS StoryMaps. Retrived 21 August 2023 from <https://storymaps.arcgis.com/stories/7c1e5428b65e4514bbb266983b54832c>.

15. Calculation of heat flow. Retrived 21 August 2023 <https://ventportal.com/ua/node/585>

16. **Ovsyannikova L.K., Sokolovska O.G., Vavlevska L.O., Hryshchuk Yu.V.** (2018) Determination of factors affecting the organization of the storage process of small-seeded oil crops. *Cereal products and compound feed, 1, 1, 23-29*

Received 21 August 2023

Approved 18 September 2023

Available in Internet 30 September 2023