

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра галузевого машинобудування

Пояснювальна записка
до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти
« магістр »
бакалавр, магістр

на тему: «Розробка способу стабілізації термовологісної характеристик
зерна при сушінні і зберіганні»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Технології і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП
спеціальності 208 Агроінженерія
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр» групи ____
Бутенко Антон Валентинович
Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: Яхін С.В.
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Ляшенко С.В.
Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2021 року

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи викладена на 77 сторінках має 38 рисунків, 11 таблиць, 4 додатки, 32 джерела.

Об'єкт дослідження – конструкція зерносховища та програмно-логічний алгоритм управління для стабілізації термовологих характеристик зерна при його сушінні та зберіганні.

Предмет дослідження – раціональні режими процесу конденсації вологи з вологого повітря на охолоджувальній поверхні випарника.

Мета дослідження – розробка та технічне забезпечення процесу сушіння та зберігання зерна в зерносховищах шляхом стабілізації його термовологих характеристик та збереження якості зерна.

Методи дослідження – розробка, розрахунок, виготовлення, узагальнення.

Результати розробки конструкція зерносховища: розроблено математичну модель процесу сушіння зерна у зерносушарці; розроблено конструкцію зерносховища та програмно-логічний алгоритм стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні; проведено виробничі випробування та розроблено рекомендації для впровадження в промисловість запропонованого способу стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні.

Ступінь впровадження – результати розрахунків та розробки конструкції використовуються для впровадження в господарство.

Галузь застосування – сільськогосподарське виробництва.

В результаті впровадження даної конструкції у виробництво очікується чистий прибуток 24934 гривні.

ЗЕРНОВА СИРОВИНА, ЗЕРНОСУШАРКА, СПОСІБ, СУШІННЯ, ЗБЕРІГАННЯ, РАЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЕНЕРГОВИТРАТИ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ.

ВСТУП

Актуальність теми. Значне моральне і фізичне зношування основних фондів хлібоприймальних підприємств сприяло зниженню якості послуг, погіршенню продовольчих характеристик зерна в процесі тривалого зберігання. Як показує аналіз, останніми роками рівень використання складських потужностей елеваторів коливався від 6 % до 100 %, а середньому ємності було завантажено на 23.. 45 %.

Ситуація зі зберіганням зерна, що склалася, найбільш негативним чином відбивається на його якості. Більшість сільськогосподарських підприємств відчувають дефіцит у зерноочисній та зерносушильній техніці та не в змозі довести зерно до базисної товарної кондиції. Тому процеси сушіння та зберігання сировини в силосах елеваторів повинні забезпечити стабілізацію термовологих характеристик зерна за мінімальних витрат енергетичних ресурсів, і, як наслідок, збереження зернопродуктів при тривалому зберіганні.

Мета дослідження – розробка та технічне забезпечення способу стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні.

Об'єкт дослідження – конструкція зерносховища та програмно-логічний алгоритм управління для стабілізації термовологих характеристик зерна при його сушінні та зберіганні.

Предмет дослідження – раціональні режими процесу конденсації вологи з вологого повітря на охолоджувальній поверхні випарника.

Теоретична та практична значущість: метою оперативного попередження самозігрівання зернової маси розроблено технологію стабілізації термовологих характеристик зерна кондиціонованим повітрям при його сушінні та зберіганні. В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані рівняння регресії, що адекватно описують процес конденсації вологи з вологого повітря на охолоджувальній поверхні випарника теплонасосної установки при його осушенні. Визначено

раціональні технологічні режими системи кондиціювання повітря, які б забезпечували максимум коефіцієнта теплопередачі, максимум температури повітря після випарника та мінімум його вмісту вологи.

Запропоновано математичну модель процесу самозігрівання зернової сировини з джерелом теплоти на поверхні вогнища самозігрівання, що дозволяє проводити систематичні розрахунки параметрів процесу поширення теплоти в силосі.

Отримана інформація ефективно використана при виборі оптимальних режимів вентилявання та охолодження зернової сировини в процесі її зберігання в силосах.

Для підвищення ефективності зберігання зернового запасу запропоновано стратегію управління процесами сушіння зерна у шахтних рециркуляційних сушарках та тривалого зберігання у зерносховищах силосного типу.

Розроблено спосіб стабілізації термовлажних характеристик при сушінні зерна в шахтній зерносушарці і його зберіганні в силосі з використанням теплонасосної установки. Визначено раціональні параметри процесів сушіння зерна, осушення та охолодження повітря, активного вентилявання зерна при можливому його самозігріванні у зерносховищі силосного типу. Розроблено програмно-логічний алгоритм стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні. Запропоновано оригінальну конструкцію зерносховища та розроблено інженерний метод його розрахунку.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1 Методи сушіння зерна

Існує кілька загальних класифікацій методів сушіння зерна [1, 2, 3] за способом підведення енергії:

1. Теплові: а) кондуктивне сушіння; б) терморадіаційне сушіння; в) конвективне сушіння; г) сушіння у полі струмів високої частоти;
2. Механічні: а) віджимання; б) центрифугування.
3. Спеціальні: а) сушіння у вакуумі; б) сушіння обезводненим повітрям; в) контактне сушіння;

Найпоширенішим методом зерносушіння є конвективний, за якого теплова енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або його суміші з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносіє та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок.

Під час конвекційного сушіння зерно може знаходитися в: гравітаційно рухомому, віброкиплячому, щільному нерухомому, псевдорозрідженому, падаючому або завислому стані. Зерновий шар визначає активну поверхню зерна, що контактує з агентом сушіння, а значить, інтенсивність процесу [1, 4]. Низький к.к.д. конвективних сушарок знаходиться в межах 25...40% який можна підвищити повторним використанням відпрацьованого агента сушіння.

Під час кондуктивного сушіння зерна теплота передається йому теплопровідністю від нагрітої поверхні труб, що обігріваються паром, гарячою водою або газом. Водяна пара, яка випаровується із зерна, поглинається холодним або підігрітим повітрям, що подається у сушильну камеру. Швидкість сушіння залежить від температури гріючої поверхні та товщини зернового шару.

Кондуктивне сушіння використовують на борошномельних і круп'яних заводах для підігрівання зерна та невеликого зниження його вологості перед переробленням, а також у комбінації з конвективним сушінням. Низький к.к.д. кондуктивних зерносушарок пояснюється додатковою втратою теплоти на нагрівання гріючої поверхні. При цьому може спостерігатися перегрівання та погіршення якості зерна, що контактує з гріючою поверхнею.

Підвищити швидкість процесу можна використанням обезводненого підігрітого повітря. Залежно від способу зменшення вологовмісту повітря розрізняють сушіння за допомогою вологовбирачів (ізотермічне сушіння) – силікагелю, активованого вугілля (при цьому виникають додаткові витрати на обезводнення вологовбирачів) та сушіння за допомогою агента, пропущеного через холодильні установки і установки конденсації вологи. Але це потребує значних витрат електроенергії. Ефективність контактного (сорбційного) зерносушіння залежить від температури та інших факторів, які характеризують стан і гігроскопічність зерна та сорбенту. Таке сушіння забезпечує краще зберігання якості зерна, але потребує витрат на перемішування і відокремлення зерна від сорбенту. Останнім часом його широко використовують в рециркуляційних сушарках, де змішуються два потоки зерна з різною вологістю, а в деяких сушарках – із різною температурою. Як сорбент застосовується підсушене нагріте зерно, що циркулює в сушарці у замкненому контурі. Нагріте в сушарці до більш високої температури, ніж сире зерно, воно у тепловологообміннику віддає частину теплоти сирому зерну та зволожується у контакті з ним [5]. Інтенсивність міжзернового вологообміну залежить від різниці вологості, температури, кратності змішування сирого та рециркулюючого зерна. Вологообмін найінтенсивніше відбувається у перші 15...20 хв, після чого процес сповільнюється. За цей час вологість сирого зерна знижується на 2,5...3 %. Температура зерна вирівнюється вже через 1,5...2 хв.

За допомогою механічних методів сушіння зерна віджиманням або центрифугуванням видаляють механічно зв'язану чи поверхневу вологу,

наприклад під час виходу зерна з мийного відділення млинів, на віджимних колонках.

У прямоточних сушарках охолодження застосовується на кінцевій стадії сушіння, що пов'язано з необхідністю переведення зерна у рівноважний стан не тільки за вологістю, а й за температурою, з метою його тривалого зберігання. Температура зерна, що виходить із сушарки, може перевищувати температуру зовнішнього повітря не більш як на 10 °С. У багатьох рециркуляційних сушарках поряд з цим є ще й проміжне охолодження рециркулюючого зерна, яке дає змогу застосовувати інтенсифіковані режими сушіння з температурою агента сушіння 250...350°С без перегрівання зерна і, крім того, забезпечує додаткове зняття вологи. Зерно охолоджують, продуваючи його зовнішнім повітрям. Інтенсивність охолодження залежить від параметрів повітря, товщини шару зерна та тривалості його охолодження [6, 7].

1.2 Способи зберігання, схеми та конструкції зерносушарок

Відкрите зберігання. Відкрите зберігання є найдешевшим, але й найменш задовільним способом – велика ймовірність шкоди від птахів, гризунів, комах, появи плісняви, поганої погоди, крадіжки, механічних пошкоджень мішків та інших неприємностей. Тому його слід використовувати лише за коротких термінів зберігання. Відкрите зберігання можна використовувати під час збирання врожаю, коли інші сховища заповнені. Зберігати зерно слід у сухому, холодному місці.

При зберіганні зерна насипом іноді бажано використовувати примусову вентиляцію, але практично це завжди можливо [8].

Зберігання зерна у спеціальних несилових спорудах. Зерно закладають у спеціальні споруди для того, щоб захистити його від погодних умов, навал шкідників і забезпечити його безпеку. В ідеальному випадку така споруда має бути оснащена системою регулювання температури та вологості,

що дозволяє зберігати зерно при постійній низькій температурі та рівні вологості. Конструкція будівлі повинна забезпечувати хороші умови для зберігання зерна та захистити його від шкідників.

Скирдування. Для скиртування повинна бути розроблена система надійного кріплення, що дозволяє, по-перше, складати рівні, надійно складені та механічно міцні скирти, та, по-друге, обробляти їх пестицидами. Покладені у порядку скирти легше підрахувати. Слід уникати скиртування навколо колон або біля стін, оскільки це ускладнює проведення перевірок та дезінфекції та може зашкодити будівлі.

Для проведення оглядів та розпилення хімікатів проходи мають бути досить широкими (не менше 1 м). Між скиртами та стінами сховища завжди мають бути залишені проходи. Для запобігання повторному зараженню після дезінфекції можна залишати ізоляційні шити, але це небажано, тому що можуть виникнути проблеми, пов'язані з конденсацією.

Холодне зберігання. Для зберігання зерна при температурі нижче межі розвитку паразитів та поширення плісняви може бути використана вентиляція. Для запобігання вологості сховище має бути ізольовано.

Аерація повітрям. При зниженні температури нижче 12 °C, розвиток більшості комах стає настільки повільним, що зараження практично припиняється. Наприклад, у країнах із помірним кліматом цілком достатня аерація атмосферним повітрям при потоці 1,66...5,0 л/с (0,1...0,3 м³/хв) на кубічний метр зерна та тривалості періоду аерації від 50 до 200 год, який можна рівномірно розтягнутий кілька тижнів. Охолодження зерна шляхом аерації атмосферним повітрям обмежують, коли температура повітря на 5...7 °C нижче, ніж температура зерна. Охолодження зерна за допомогою аерації атмосферним повітрям отримало широке застосування в країнах помірного клімату, де таким чином обробляють насипи одиночні з масою більше 50 000 т.

Коли вміст вологи перевищує безпечну межу, швидке розвиток цвілі зупиняє аерація, що знижує температуру зерна. При вмісті вологи понад 18

мас. % затхлий запах може виникнути через 5...6 міс. в залежності від температури і відбувається зростання плісняви.

У цьому випадку постійна аерація при високій швидкості потоку (приблизно в десять разів більше, ніж просто для охолодження) забезпечує підсушування, якщо температура не нижче 4...5 °С ночами і під час дощу. Однак такий метод підходить тільки для невеликих кількостей та невисоких закладок.

Охолодження холодним повітрям. Щоб запобігти псуванню, що викликається паразитами та пліснявою, зерно слід довести до необхідної температури швидко. Ця температура залежить від вмісту вологи і не повинна бути вищою за 10 °С для зерна з вмістом вологи 15 мас. %. Аерація охолодженим повітрям забезпечує швидке охолодження, що обмежує розвиток паразитів. При охолодженні вони можуть загинути і зерно буде зберігатися дуже добре. Енергетичні витрати можна порівняти з системами охолодження навколишнього повітря [9].

Безтарне зберігання у «плоских сховищах». Горизонтальний спосіб зберігання насипного зерна дешевий, але при цьому можуть виникати труднощі в обробці та контролі присутності комах. Тому важливо забезпечити наявність необхідного обладнання для зберігання та контролю якості: відповідну систему обробки, обладнання для обкурювання, відбору проб та вимірювання температури зерна.

У скиртах існує небезпека розвитку градієнтів температури, що призводять до переміщення вологості і можливого зростання плісняви, особливо в шарі 5...20 см від поверхні і навпроти підлоги і стін. Цю проблему можна вирішити за допомогою примусової вентиляції.

Силососховище. Залежно від рівня технічного розвитку можуть бути використані різні контейнери.

Блоки силососховищ можуть відрізнятися за розмірами, починаючи від невеликих контейнерів, ємністю кілька кілограмів, до величезних споруд, що складаються з багатьох силососховищ, ємністю понад 1000 тон. Найчастіше

використовують великі силосховища, але їхнє будівництво обходиться дуже дорого. Великі споруди або баштові силосховища є дуже складними установками і використовувати їх при тривалому зберіганні економічно не вигідно.

Силосховища повинні бути розраховані з урахуванням можливих навантажень, якісно оброблені та не мати тріщин та щілин на внутрішній обробці стін. У проекті сховища має бути передбачене обладнання для обкурювання, очищення, відбору проб, контролю та моніторингу температури, а також вентиляційна система. На відміну від великих, на невеликих фермерських силосховищах не обов'язково мати автоматизовані засоби механічної обробки зерна [10].

Конструктивні схеми більшості основних типів сушарок наведені на рисунку 1.1.

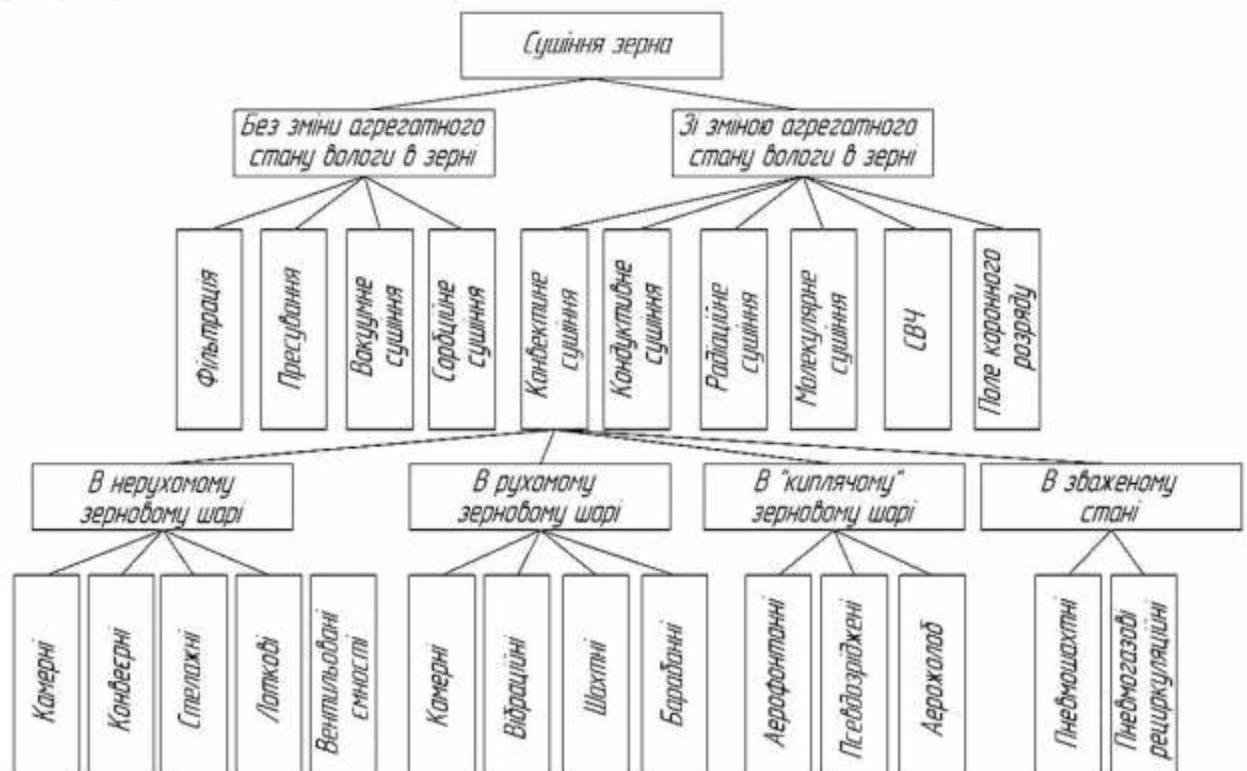
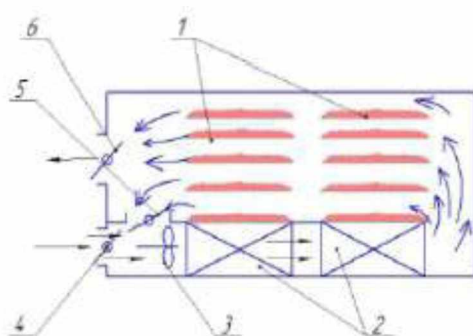


Рисунок 1.1 – Конструктивні схеми основних типів сушарок

Камерні сушарки (рис. 1.2) є герметичними камерами, всередині яких матеріал, що висушується, в залежності від його виду розташовується на сітках, деках, затискачах і інших пристроях.

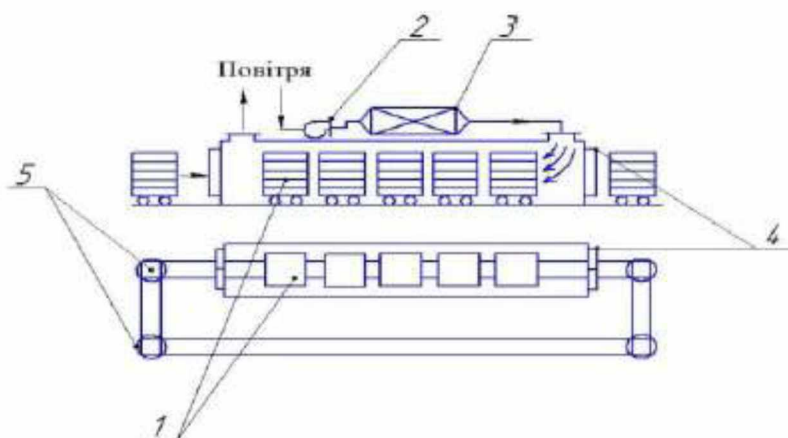
За допомогою вентилятора 3 свіже повітря через калорифер 2 подають в простір камери, всередині камери знаходяться полиці 1 з матеріалом, що висушується. Перевагами даних сушарок є простота будови та принцип роботи. Основними недоліками даних сушарок є відносно мала продуктивність, що спричинена періодичністю дії; нерівномірна вологість по всьому об'єму зернової маси [11].



1 – полиці для завантаження матеріалу, що висушується; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4, 5, 6 – заслінки для регулювання втрат свіжого, рециркулюючого і відпрацьованого повітря

Рисунок 1.2 – Камерна сушарка

Тунельні сушарки, як правило, є апаратами безперервної дії, які представляють собою довгі камери, в яких розміщуються вагонетки з матеріалом, що висушується (рис. 1.3) [11].

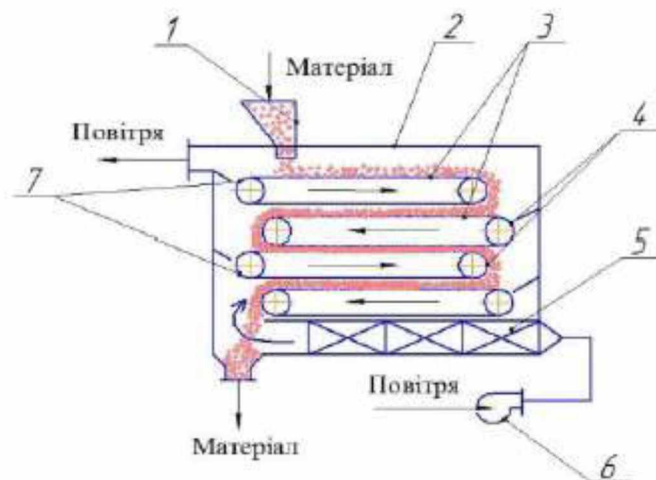


1 – вагонетки з матеріалом, що висушується; 2 – вентилятор; 3 – калорифер; 4 – герметичні двері; 5 – поворотні колеса

Рисунок 1.3 – Тунельна сушарка

Всередині тунельної сушарки по рейках повільно переміщується ряд вагонеток 1, завантажених матеріалом, що висушується. Через вентилятором 2 подається потік нагрітого повітря через калорифер 3, проходить уздовж тунелю, продуваючи поверхню матеріалу, що висушується (в даному випадку протivotоком), і випаровуючи вологу. Бокові частини тунелю закриваються щільно прилеглими дверима-шлюзами 4, які періодично відкриваються для видалення з донного кінця вагонетки з висушеним матеріалом і завантаження з іншого кінця вагонетки з вологим матеріалом. Основна перевага даної сушарки – безперервність дії. Недолік – переміщення матеріалу відбувається нерівномірно, що не забезпечує рівномірність сушіння зернової маси [11].

Стрічкові сушарки (рис. 1.4) призначені для сушіння сипучого матеріалу і волокнистих матеріалів, а також готових виробів і напівфабрикатів.



1 – живильник; 2 – сушильна камера; 3 – стрічкові транспортери; 4 – ведучі барабани; 5 – калорифер; 6 – вентилятор; 7 – ведені барабани

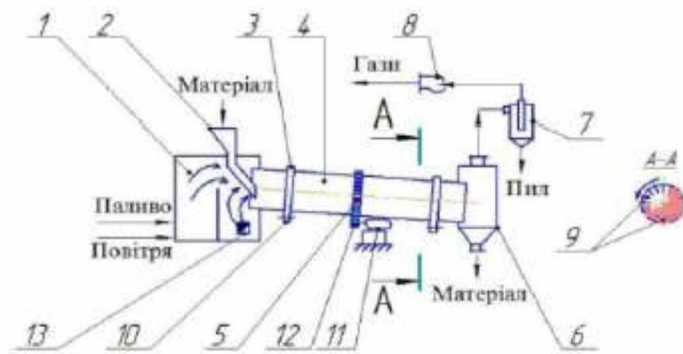
Рисунок 1.4 – Стрічкова багатоярусна сушарка

У стрічкових сушарках сушіння здійснюється безперервно за допомогою атмосферного тиску. У сушильній камері 2 висушуваний шар матеріалу рухається на стрічках транспортерів, натягнутих між ведучими 4 і веденими 7 барабанами. Переміщення матеріалу зі стрічки на стрічку

збільшується поверхня його контакту з сушильним агентом, що підвищує швидкість сушіння. Стрічкові сушарки бувають прямоточні і протитечійні.

Перевагою стрічкових сушарок є безперервність дії. Основними недоліками є велика металоємність і складність обслуговування.

Барабанні сушарки (рис. 1.5) призначені для безперервного сушіння зернової маси.



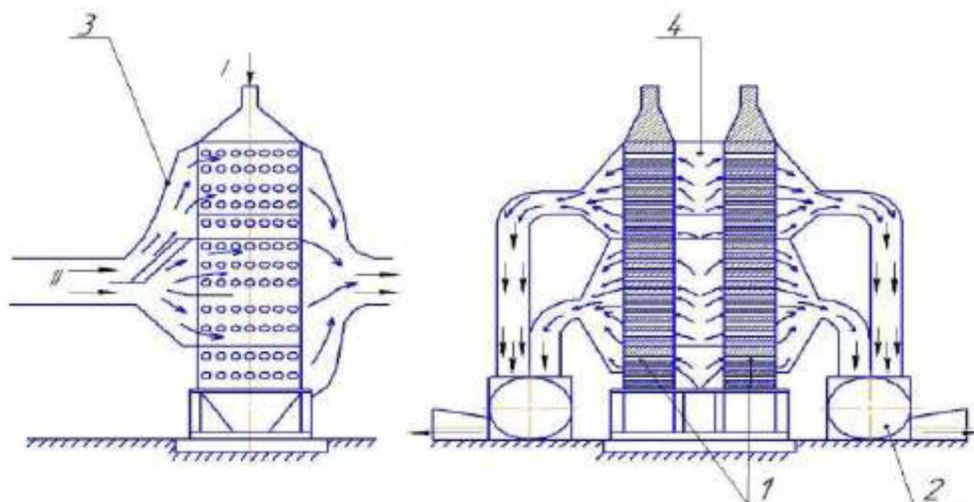
1 – камера згорання; 2 – живильник; 3 – бандажі; 4 – барабан; 5 – зубчастий вінець; 6 – розвантажувальна камера; 7 – циклон; 8 – вентилятор; 9 – підйомно-лопатєва насадка; 10 – опорні ролики; 11 – електропривод; 12 – зубчаста передача; 13 – вікно для подачі вторинного повітря

Рисунок 1.5 – Барабанна сушарка

Барабанна сушарка складається з циліндричного зварного барабана 4, встановленого з невеликим нахилом до горизонту в межах $2-7^{\circ}$ і спирається за допомогою бандажів 3 на ролики 10. За допомогою електроприводу 11 барабан приводиться в обертання через зубчасту передачу за допомогою вінця 5. Частота обертання барабана зазвичай знаходиться в межах 5-8 об/хв. Зерновий матеріал подається в барабан живильником 2 і надходить на внутрішню насадку 9, розташовану уздовж майже всієї довжини барабана. Насадка, тип якої визначається властивостями матеріалу, що висушується, забезпечує рівномірний розподіл і перемішування матеріалу по перерізі барабана, а також його контакт з сушильним агентом при пересипанні. До переваг барабанних сушарок слід віднести: велику продуктивність, високу економічність у витратах тепла й електроенергії, надійність у роботі, простоту конструкції і зручність експлуатації. Недоліки сушарок

обумовлюються їх громіздкістю, високими капітальними витратами, тривалому контакті матеріалу з тепловим агентом (до 40 хв), забруднення продуктів золою з топки (0,2-0,7 %), а також пожежонебезпекою та викидами в атмосферу [11].

Шахтні сушарки (рис. 1.6) є установками безперервної дії.



1 – шахти; 2 – вентилятор; 3 – дифузор; 4 – напірна камера агента сушіння;

I – зерно; II – агент сушіння

Рисунок 1.6 – Технологічна схема шахтної зерносушарки

В режимі роботи зерно безперервно надходить у верхній частині шахти. Зернова маса рухається вниз за рахунок сили тяжіння і сипучості. Сушіння зернової маси відбувається впоперек потоку зерна. Зерно в шахті розрихлене при русі обертається в різних напрямках, що поліпшує його взаємодію з агентом сушіння і прискорюється вологообмін. Швидкість руху зерна і час знаходження його в шахті регулюють за допомогою випускного пристрою.

Тривалість перебування зерна в шахті може досягати 40 хвилин в залежності від відсотку вологи зернової маси, і за один прохід його вологість знижується на 4-6%.

Перевага шахтних сушарок: можливість регулювати тривалість перебування зерна в сушильній камері і досить надійно забезпечувати підтримку заданого температурного режиму сушіння зернової маси.

Основними недоліком є обмеження рівня зняття вологи за один прохід зерна через шахту в межах 4-6%. Для повного висушування зерна іноді доводиться проводити обробку в кілька прийомів. Перезатримка частково просушеного зерна в очікуванні повторних проходів через сушарку є причиною зниження його якості [11].

Сучасна та відома модульна сушарка «Сапфір» (рис. 1.7) виробництва української компанії, працює за технологією сушіння зерна “cross-flow” (термін “cross-flow” означає, що в процесі сушіння нагріте повітря проходить перпендикулярно зерну, яке рухається в сушарці) [12].

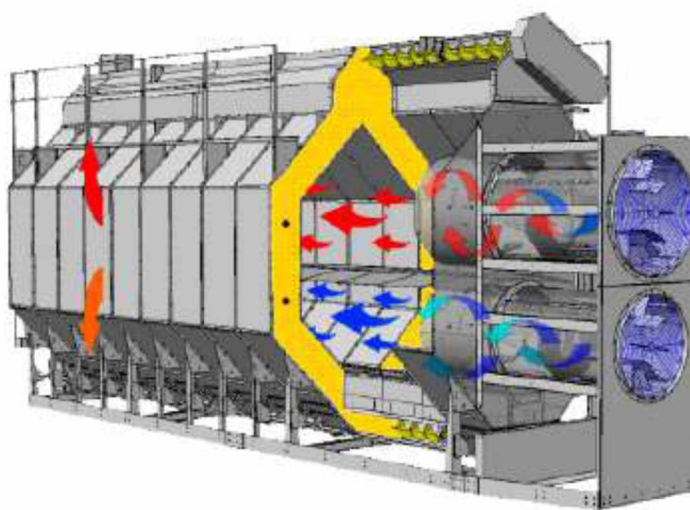


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд модульної зерносушарки «Сапфір»

Принцип роботи модульних (колонкових) зерносушарок «Сапфір»: зерно транспортерами транспортується в верхню частину зерносушарки, де шнек завантажує рівномірно колони по черзі по всій довжині сушарки; з навколишнього середовища вентилятор нагнітає повітря, яке нагріваючись пальником, змішується з вже нагрітим повітрям та потрапляє в камеру сушіння [12].

Основною перевагою сушарки є висока продуктивність. Недоліками є високі енергозатрати на висушування зернової сировини, велика металоємність та неможливість використання у дрібних сільськогосподарських господарствах [12]. Баштова зерносушарка «Сапфір» (рис. 1.8) виробництва МЗЕО являє собою сушильну установку, вологе зерно в якій за допомогою верхнього допоміжного обладнання (норія, транспортер)

через завантажувальний отвір подається до верхньої частини та рівномірно наповнює зернові колони, розміщені по колу зерносушарки [12].

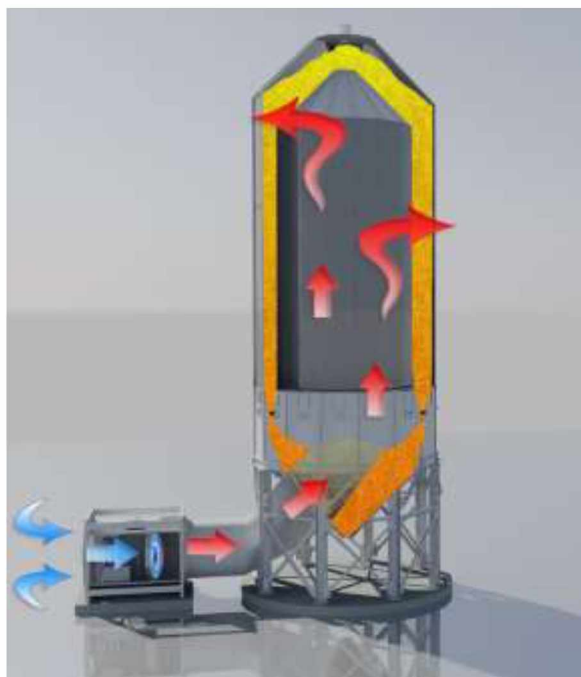


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд баштової зерносушарки «Сапфір»

Зерносушарки Perry (Англія) (рис. 1.9) працюють в режимі сушіння зерна зі змішаним потоком і в першу чергу призначені для сушіння зернових матеріалів таких як пшениця, ячмінь і кукурудза.

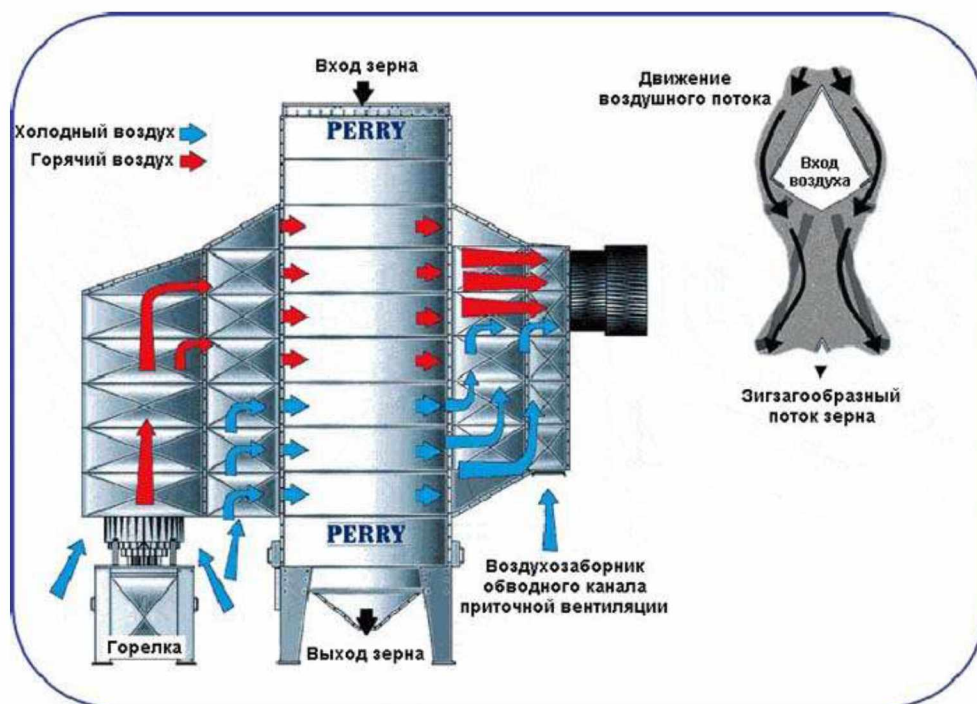


Рисунок 1.9 – Схема зерносушарки Perry

Продукція до зерносушарки надходить зверху через вхідний отвір на даху, повністю заповнюючи шахту. Для більшої частини продукції, що знаходиться в сушарці, гаряче повітря з печі подається через неї вентиляторами по системі підвідних і відвідних коробів, розташованих усередині шахти. Щоб охолодити продукцію перед вивантаженням, коли вона досягає нижньої частини шахти зерносушарки, повітря з температурою навколишнього середовища засмоктується через неї з підвідної камери охолодження по тій же системі підвідних і відвідних коробів.

Перевагами зерносушарок PERRY є висока продуктивність та якість отриманої зернової сировини. Недоліками є висока металоємність, складність конструкції та обслуговування.



Рисунок 1.10 – Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння зерна

2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Програма експериментальних досліджень

Програма дослідження:

1. Розробити конструкцію зерносховища та програмнологічний алгоритм стабілізації термовологісних характеристик зерна при сушіння та зберігання.
2. Виконання інженерного розрахунку зерносховища.
3. Розробка способу стабілізації термовологісних характеристик зерна при його сушінні та зберіганні.

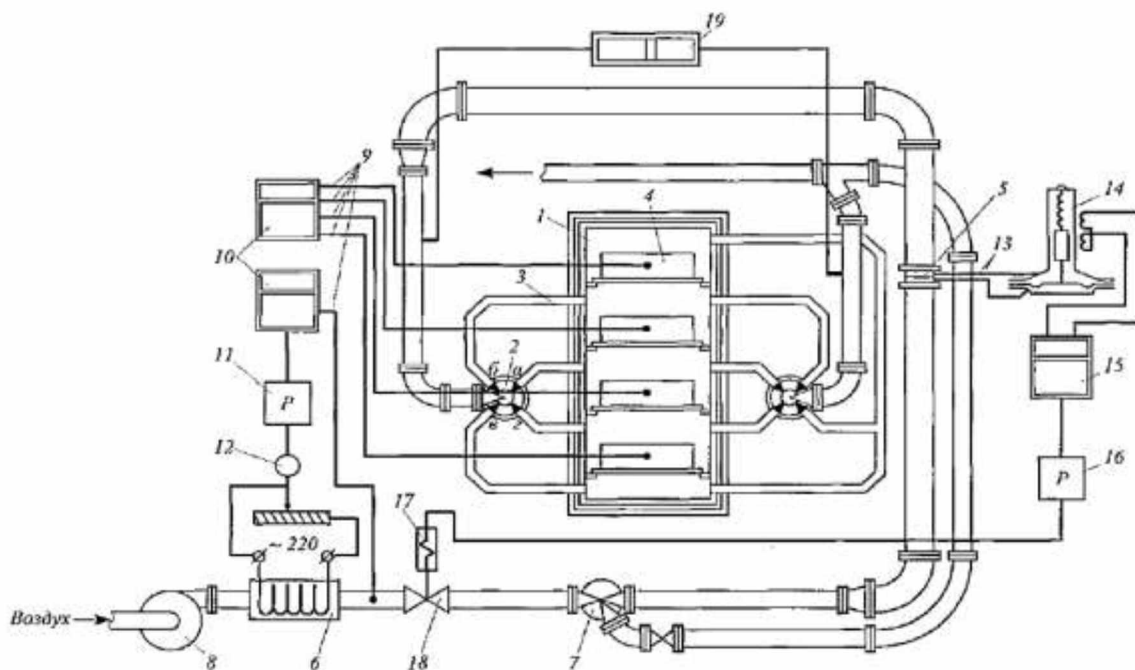
2.2 Експериментальна установка та методика проведення експериментів

Для дослідження процесу сушіння зерна використовувалася експериментальна установка, створена на кафедрі «Технології зберігання та переробки зерна» Воронезької державної технологічної академії (рис. 2.1).

Установка включала вертикальну циліндричну сушильну камеру 1, кільцеву систему повітропроводів, розподільник повітря на чотири проходи 3, нагнітальний відцентровий вентилятор 4 і калорифер 5. Сушильна камера складалася з чотирьох секцій, в яких встановлювалися знімні касети 6, в кожній з яких товщина становила 100 мм. Для кожної касети були приварені штуцера, що герметично закриваються, через які визначали температуру і вологість зерна. Кільцева система 2 підводять та відводять повітропроводів влаштована так, що дві з чотирьох касет продувались повітрям послідовно знизу вгору, а дві інші - зверху вниз. Напрямок потоку повітря змінювали

багатоходовими розподільниками. Середня швидкість переміщення зерна в зерносушарках не перевищує 3...5 мм/с, а відстань між рядами коробок, що підводять і відводять, становить 200 мм. Перед вентилятором, що нагнітає, встановлений електро-калорифер, що складається з трубчастих електронагрівачів типу «С».

Експериментальна установка оснащена системами автоматичного регулювання температури та витрати повітря, вимірювання та запису температури зерна в контрольних точках. Система автоматичного керування температурою повітря включала самописний потенціометр КСП-3, датчик - хромель-копелеву термопару ТХК (діаметр електрода 0,1 мм), виконавчий механізм - магнітний пускач ПМЕ-321 для керування роботою електрокалорифера [13, 21].



1 – сушильна камера; 2 – розподільник повітря на чотири проходи (а, б, в, г); 3 – кільцева система повітропроводів; 4 – касета із зерном; 5 – діафрагма; 6 – електрокалорифер; 7 – триходовий кран; 8 – вентилятор; 9 – термопары; 10 – потенціометри; 11 – терморегулятор; 12 – виконавчий механізм; 13 – імпульсні трубки; 14 – мембранний дифманометр ДМ; 15 – вторинний прилад КСД; 16 – регулятор; 17 – електромагнітний виконавчий механізм; 18 – керована заслінка; 19 – гігрометр "Хвиля 1М"

Рисунок 2.1 – Схема установки для дослідження процесу сушіння зерна

Необхідна температура повітря підтримувалася шляхом зміни напруги на ТЕН за допомогою реостата. За допомогою термопари ТХК знімався електричний сигнал, пропорційний температурі повітря на вході в сушильну камеру. Сигнал надходив на вхід регулятора, де порівнювався із заданим значенням температури. У разі розбалансу регулятор подавав сигнал на виконавчий механізм, який включав або вимикав ТЕНи. Вимірювання температури зерна в касетах проводилося термопарами ТХК та електронним автоматичним самоточним багатоточковим потенціометром КСП-4. За температуру зерна приймалася температура, виміряна за допомогою термопари, введеної в одиничне зерно та розташоване в середині зернового шару.

Система автоматичного регулювання витратою повітря включала витратомір, що складається з пристрою, що звужує - камерної діафрагми ДНК-6 і дифманометра ДМ 3583, вторинний прилад диференціально-трансформаторної системи КСД з регулятором, електричний виконавчий механізм МЕО, встановлений на підводному повітроводі.

Контроль відносної вологості сушильного агента на вході і виході з сушильної камери здійснювався гігрометром «Хвиля -1М», датчики якого відповідно встановлювалися в повітропроводі, що підводить, і лінії відведення відпрацьованого повітря.

Вологість висушеного зерна визначалася методом висушування проб у сушильній шафі до постійної маси при температурі 403 К протягом 40 хвилин. Для проведення дослідів установка виводилася на заданий режим роботи її прогрівання гарячим повітрям протягом 30 хвилин.

2.3 Математична модель тепло- та масопереносу в процесі сушіння зерна

Математичний опис процесу сушіння зерна утруднено, оскільки зерно неоднорідне за структурою та складом. Рухомий шар вологого зерна сприймається як суцільна середовище, коли дослідженню підлягає температурне полі, і як дискретна, коли ставиться завдання визначення поля вологовмісту [14, 15, 16, 22, 23].

При вирішенні низки завдань, пов'язаних з моделюванням технологічних процесів тепло- і масопереносу, доводиться мати справу з рухомим шаром дисперсного матеріалу. Було сформульовано і розв'язано завдання для нерухомого шару з урахуванням розподіленості потенціалів усередині частинок [16, 17, 23].

При цьому частинки шару приймаються досить малими, щоб можна було знехтувати градієнтами потенціалів перенесення, і шар розглядають як суцільне середовище, поклавши основу розрахунку рівняння теплопередачі з джерелами. Для зерна градієнти температури дійсно настільки малі, що ними можна знехтувати, в той час як градієнтами вмісту вологи нехтувати не можна, причому коефіцієнт дифузії вологи a_m , що залежить від температури і вмісту вологи, грає визначальну роль в процесах сушіння [18, 20]. На підставі цього було складено спрощену систему зв'язаного перенесення, залишивши для температури рівняння теплопередачі з розподіленим джерелом без урахування потоків тепла за рахунок теплопровідності шару, а для вмісту вологи - рівняння конвективної дифузії.

Виходячи з рівняння перенесення внутрішньої енергії [25]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\sum_i \rho'_i \cdot h_i \right) = \text{div} \cdot (\lambda' \cdot \nabla t) - \text{div} \cdot \left(\sum_i h_i \cdot J_i \right) + I_q, \quad (2.1)$$

де підсумовування проводиться за всіма компонентами субстанції, що переноситься з урахуванням рівняння безперервності

$$\frac{\partial \cdot \rho'_i}{\partial \tau} = -\text{div} \cdot J_i + I_i, \quad (2.2)$$

та наступних рівностей:

$$J_i = \rho'_i \cdot w, \quad \rho'_i = u_i \cdot \gamma', \quad I_1 = -I_2, \quad (2.3)$$

отримаємо

$$c' \cdot \gamma' \frac{\partial_t}{\partial_\tau} = \operatorname{div} \cdot (\lambda' \cdot \nabla t) - c' \cdot \gamma' \cdot w \cdot \nabla t + I_q + r \cdot \left[\frac{\partial \cdot (\bar{u} \cdot \gamma')}{\partial \cdot \tau} + w \cdot \Delta(\bar{u} \cdot \gamma') \right], \quad (2.4)$$

де $c' = \sum_i c_i \cdot u_i$ – наведена питома теплоємність дисперсного матеріалу;

$$\bar{u} \approx \frac{\rho'_2}{\gamma'}; \quad \gamma' = \gamma \cdot (1 - P); \quad w = w \cdot (\tau).$$

Питома потужність джерел теплоти за визначенням [19, 22]:

$$I_q = \frac{q \cdot \Phi}{V} = \alpha \cdot F \cdot (t_c - t) \text{ (для матеріалу)}, \quad (2.5)$$

$$I_q^c = \frac{q \cdot \Phi}{V} = \alpha \cdot F \cdot (t - t_c) \text{ (для середовища)}. \quad (2.6)$$

Тоді, нехтуючи потоками теплоти у шарі за рахунок теплопровідності порівняно з конвективними потоками [14,37, 54, 55], отримаємо

$$\frac{\partial_t}{\partial_\tau} - w \cdot (\tau) \nabla t + \frac{\alpha \cdot F}{c' \cdot \gamma \cdot (1 - P)} \cdot (t - t_c) - \frac{r}{c'} \left[\frac{\partial \cdot (\bar{u})}{\partial_\tau} + w \cdot (\tau) \cdot \nabla \bar{u} \right] = 0, \quad (2.7)$$

Далі на підставі рівняння безперервності для компонентів, що входять до складу окремих частинок

$$\frac{\partial \cdot \rho'_i}{\partial_\tau} = -\operatorname{div} \cdot (j_i + J_i) + I_i, \quad (2.8)$$

та врахування рівностей

$$\rho'_i = u_i \cdot \gamma, \quad \sum_i \frac{\partial \cdot u_i}{\partial \cdot \tau} \approx \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot \tau} \quad (2.9)$$

та вирази для дифузійного потоку вологи [45,100]

$$j_i = -a_m \cdot \gamma \cdot (\nabla u + \delta \cdot \nabla t), \quad (2.10)$$

нехтуючи усадкою (тобто вважаючи величину u величиною постійної), отримаємо рівняння конвективної дифузії

$$\frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot \tau} + w(\tau) \cdot \nabla u = \operatorname{div} \cdot (a_m \cdot \nabla u + a_m \cdot \delta \cdot \nabla t). \quad (2.11)$$

В результаті вимушеної конвекції пара крізь частинок концентрація вологи γ_1 у пароподібному середовищі виявляється розподіленою у просторі. Використовуючи рівняння безперервності для маси пари, отримаємо

$$\frac{\partial \cdot \gamma_1}{\partial \cdot \tau} + \nu \cdot (\tau) \cdot \nabla \gamma_1 - \frac{q_m \cdot F}{P} = 0. \quad (2.12)$$

Рівняння конвективної дифузії, що входить у цю систему, аналогічне рівняння Фур'є-Кірхгофа, використовувалося щодо тепло- і масопереносу в бінарної парогазової суміші, а також різних процесів конвективної дифузії в рідинах [22, 26]. При русі капілярно-пористих частинок конвективне перенесення вологи обумовлює просторовий розподіл вмісту вологи по довжині сушильного апарату.

Граничні умови рівняння (2.11) залежать як від вибору системи координат, і від форми частки. Систему координат вибирають наскільки можна такою, щоб вона була пристосована до завдання. Для плоских частинок найбільш застосовна декартова прямокутна система координат, а для частинок циліндричної або сферичної форми - циліндрична система, оскільки оператор Лапласа в сферичній системі координат для великих (порівняно з розмірами частинок) значень координати τ і малих значень θ набуває вигляду, відповідного циліндричній системі. Частинки довільної форми бажано моделювати циліндричними та плоскими частинками, оскільки для них у разі осьового руху найбільш просто задаються граничні умови.

Просторовий розподіл поля температури будемо розглядати в декартовій прямокутній системі координат (x, y) . Тоді, наприклад, для шару частинок циліндричної форми, що рухаються в напрямку осі симетрії X і перехресного (під кутом 90°) руху сушильного агента, система (2.12) набуває вигляду (без урахування аксіальної вологопровідності):

$$\frac{\partial \cdot \gamma_1}{\partial \cdot \tau} + \nu \cdot (\tau) \cdot \frac{\partial \cdot \gamma_1}{\partial \cdot y} - \frac{\beta \cdot \gamma \cdot F}{P} \cdot (u_R - u_P) = 0 \quad (2.13)$$

$$\text{де } a_m = a_m \cdot (t); \quad \bar{u} \cdot (\tau, x, y) = \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^R r \cdot u(\tau, x, y, r) \cdot dr; \quad u_R = u \cdot (\tau, x, y, R);$$

$$u_p = u_p \cdot (t, \varphi); \quad \varphi = \frac{\gamma_1}{\gamma_1^{\max} \cdot (t_c, p_c)},$$

з граничними умовами

$$t \cdot (\tau, 0, y) = f_1 \cdot (\tau, y), \quad t_c \cdot (\tau, x, 0) = \varphi_1 \cdot (\tau, x), \quad u \cdot (\tau, 0, y, r) = u^0 \cdot (\tau, y, r), \\ \gamma_1 \cdot (\tau, x, 0) = x_1 \cdot (\tau, x),$$

$$\frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot \tau}(\tau, x, y, R) = -\frac{\beta}{a_m} \cdot (u_R - u_p), \quad (2.14)$$

та початковими умовами

$$t \cdot (0, x, y) = f_2 \cdot (x, y), \quad t_c \cdot (0, x, y) = \varphi_2 \cdot (x, y), \quad u \cdot (0, x, y, r) = u_0 \cdot (x, y, r), \\ \gamma_1 \cdot (0, x, y) = x_2 \cdot (x, y). \quad (2.15)$$

На осі циліндричної частки накладається умова обмеженості для функції u .

Коефіцієнти теплообміну a і масообміну β , як вказувалося в роботах [22, 23], слід вважати залежать не тільки від гідродинаміки потоку, фізичних властивостей газу, характерного розміру обтічної поверхні, а й від часу, теплофізичних властивостей тіла, розподілу джерел тепла тощо.

Ця обставина має місце навіть у разі «стаціонарного» процесу в сушильному апараті (коли рівні нулю приватні похідні за часом шуканих змінних), бо внаслідок рухливості системи деякі просторові змінні відіграють роль часу, і процес носить нестационарний характер. Таким чином, постановка крайової задачі (2.13) - (2.15) є напівемпіричною і, отже, менш природною, ніж постановка пов'язаної крайової задачі [22].

Коли розглядається конкретна шахтна прямоточна зерносушарка з рухомим зерновим шаром, деякі величини, що входять у модель, відомі (товщина шару, температура та відносна вологість сушильного агента на виході з шару тощо). Тому, використовуючи модель (2,13) при розробці системи управління, можна попередньо усереднити шукані керовані змінні за деякими просторовими координатами. Особливо це зробити для температури

матеріалу і температури сушильного агента (остання на виході з шару приблизно дорівнює температурі матеріалу) по координаті y .

Функції, що входять у початкові умови (2.15), взагалі кажучи, довільні, але вони можуть бути, наприклад, будь-яким початковим стаціонарним станом (у згаданому вище сенсі), з якого фізична система (шар дисперсного матеріалу) виходить при мінливих часом параметри моделі. У такому випадку система (2.13) визначає перехідний процес для розподілених у просторі температури та вмісту вологи. При практичній побудові моделі конкретного об'єкта (з відповідними обмеженнями на керовані і керуючі змінні, з урахуванням впливів, що обурюють, які впливають на процес і піддаються вимірюванню) не обов'язково знання всіх теплофізичних коефіцієнтів, що входять в модель, бо за допомогою зазначених методів можна проводити налаштування моделі, ґрунтуючись тільки на формі її рівнянь.

На основі та при подальшій конкретизації систем рівнянь (2.13) стосовно шахтних прямоточних зерносушарок наведемо математичну модель до зручного вигляду для відшукування оптимальних технологічних режимів та управління процесом, використовуючи для вирішення системи диференціальних рівнянь наближені обчислювальні методи та ЕВМ.

2.4 Математична модель процесу сушіння в рухомому шарі дисперсного матеріалу при перехресному русі шару зерна та повітря

Для побудови математичної моделі аналогічно [23] приймемо такі припущення; форму поверхні частки уподібнюємо необмеженого циліндра; нехтуємо аксіальною вологопровідністю, термодифузією, теплопровідністю зернової маси [23]. Тоді систему диференціальних рівнянь (2.13) - (2.15) можна записати у вигляді системи рівнянь, що зв'язують температуру і вологовміст і дисперсного матеріалу, рухається безперервним потоком:

$$\frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot \tau} + w \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot x} - a_m \cdot (\tau) \cdot \left(\frac{\partial^2 \cdot u}{\partial \cdot \tau^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot \tau} \right) = 0, \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \cdot \theta}{\partial \cdot \tau} + w \cdot \frac{\partial \cdot \theta}{\partial \cdot x} + \frac{A \cdot (v)}{c' \cdot \gamma'} \cdot (\theta - t_c) - \frac{r}{c'} \cdot \left[\frac{\partial \cdot \bar{u}}{\partial \cdot \tau} + w \cdot \frac{\partial \cdot \bar{u}}{\partial \cdot x} \right] = 0, \quad (2.17)$$

$$\text{де } \bar{u} \cdot (\tau, x) = \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^R r \cdot u(\tau, x, r) \cdot d \cdot r,$$

з граничними умовами

$$u(\tau, 0, r) = u^0 \cdot (\tau, r), \quad (2.18)$$

$$\left. \frac{\partial \cdot u(\tau, x, r)}{\partial \cdot r} \right|_{r=R} = - \frac{B \cdot (t, v)}{a_m \cdot (\theta)} \cdot (u_R - u_p), \quad u_R < u_p, \quad (2.19)$$

з початковими умовами

$$u \cdot (0, x, r) = u_0 \cdot (x, r), \quad \theta \cdot (0, x) = \theta_0 \cdot (x), \quad (2.20)$$

та з умовами симетрії

$$\left. \frac{\partial \cdot u(\tau, x, r)}{\partial \cdot r} \right|_{r=R} = 0 \quad \theta \cdot (r, 0) = f \cdot (r). \quad (2.21)$$

У рівняннях (2.16) - (2.21) прийнято такі позначення: τ – час, с; x – координата по довжині сушарки, м; r – координата вздовж радіусу зерна, м; w - швидкість руху матеріалу в апараті, м/с; v – швидкість сушильного агента на вході зернову масу, м/с; a_m - коефіцієнт дифузії вологи, м²/с; t_c - температура сушильного агента, °С; c' - теплоємність зернової маси, кДж/(кг·К); r - питома теплота пароутворення, кДж/кг; A – емпіричний коефіцієнт теплообміну, кДж/(м³·К); B – емпіричний коефіцієнт масообміну, $B = \beta$, β – коефіцієнт масовіддачі, кг/[м²·с-(кг/м³)]; γ_1 – щільність зернового шару, кг/м³; u_0 , θ_0 – відповідно початковий розподіл вмісту вологи, кг/кг і температури, К, зернового шару по довжині сушарки, u^0 – вміст вологи вмісту зернового шару на вході в сушарку; p , R – індекси відповідні рівноважному вологовмісту і вологостриманню на поверхні зерна.

Система (2.16) – (2.21) описує процес сушіння дисперсного шару за умови перехресного руху зерна та агента сушіння.

Введемо безрозмірні координати: $X = \frac{x}{P_e \cdot R}$, $Z = \frac{r}{R}$, де $P_e = \frac{w \cdot R}{a}$ – критерій Пекле, a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; безрозмірну температуру $T = \frac{t_c - \theta}{t_c - \theta_0}$, безрозмірний вміст води $U = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}$ – мірний критерій Фур'є $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ визначення безрозмірного часу.

Тоді система рівнянь (2.16) - (2.21) перетворюється на безрозмірну форму [24]:

$$\frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot F_0} + \frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot X} = L \cdot u \cdot \left(\frac{\partial^2 \cdot U}{\partial \cdot Z^2} + \frac{1}{Z} \cdot \frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot Z} \right), \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \cdot T}{\partial \cdot F_0} + \frac{\partial \cdot T}{\partial \cdot X} = -N \quad (2.23)$$

де $U_R = U \cdot (F_0, X, Z)|_{z=1}$,

з граничною умовою

$$\left. \frac{\partial \cdot U \cdot (F_0, X, Z)}{\partial \cdot Z} \right|_{z=1} = -B \cdot i'_m \cdot U_R, \quad (2.24)$$

з початковими умовами

$$U \cdot (F_0, X, Z)|_{F_0=0} = 1, \quad T \cdot (F_0, X, Z)|_{F_0=0} = 1, \quad (2.25)$$

і умовам симетрії

$$\left. \frac{\partial \cdot U \cdot (F_0, X, Z)}{\partial \cdot Z} \right|_{z=0} = 0 \quad (2.26)$$

В рівняннях (2.22) – (2.26) $L_u = \frac{a_m}{a}$ – критерій Ликова;

$K_0 = \frac{R_0 \cdot (u_0 - u_p)}{c' \cdot (t_c - \theta)}$ – критерій Коссовича; $N'_u = \frac{A \cdot R^2}{c' \cdot \gamma' \cdot \alpha}$ – емпіричний критерій

Нусельта; $B \cdot i'_m = \frac{B \cdot R}{a_m}$ – емпіричний масообмінний критерій Біо.

При перетворенні рівнянь (2.22) – (2.26) в систему рівнянь у безрозмірному вигляді використовувався зв'язок середньої швидкості сушіння з поверхневим вмістом води

$$\Delta \bar{u} = \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^R r \cdot \Delta u \cdot d \cdot r = \frac{2}{R^2} \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot r} \Big|_{r=R} = \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial \cdot u}{\partial \cdot R} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \cdot \bar{u}}{\partial \cdot \tau} + w \cdot \frac{\partial \cdot \bar{u}}{\partial \cdot x} = -\frac{2 \cdot B}{R} \cdot (u_R - u_p), \quad (2.28)$$

де Δ – оператор Лапласа.

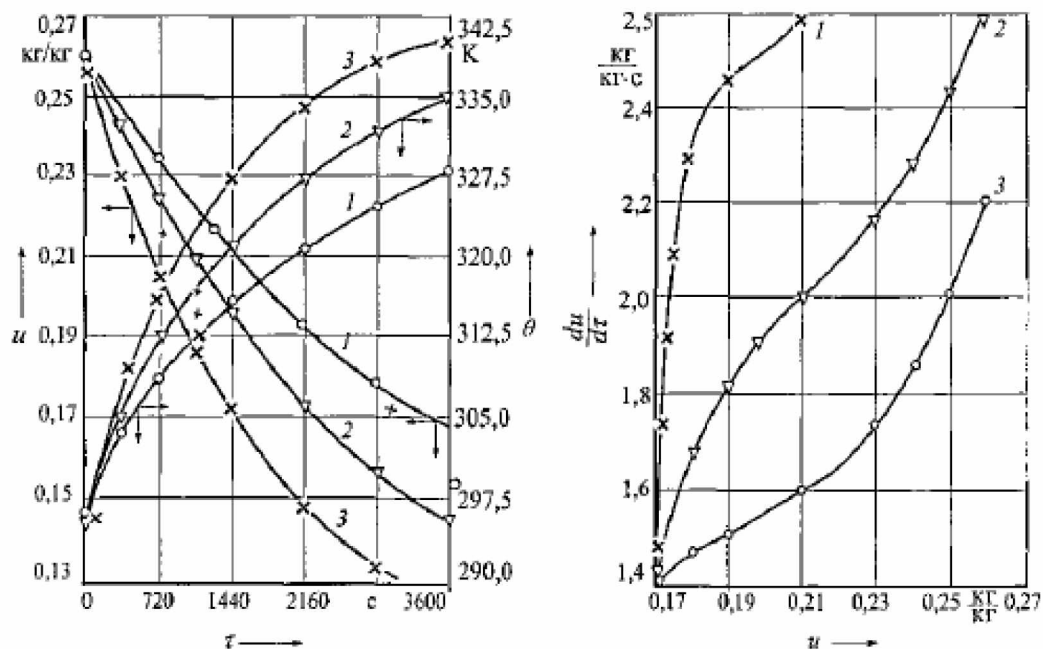
Стационарний стан $\frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot F_0} = 0$, $\frac{\partial \cdot T}{\partial \cdot F_0} = 0$ об'єкта сушіння визначається

наступною системою рівняння:

$$\frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot X} = L_u \cdot \left(\frac{\partial^2 \cdot U}{\partial \cdot Z^2} + \frac{1}{Z} \cdot \frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot Z} \right), \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \cdot T}{\partial \cdot X} = -N \cdot u' \cdot T + K_0 \cdot B \cdot i'_m \cdot U_R, \quad (2.30)$$

з граничною умовою (2.24), початковими умовами (2.25) та умовами сполучення (2.26). Таким чином, отримана система рівнянь (2.22) – (2.30) у безрозмірному вигляді, що описує процес сушіння при позовжньому переміщенні продукту та перехресному русі агента сушіння через шар зернової маси.

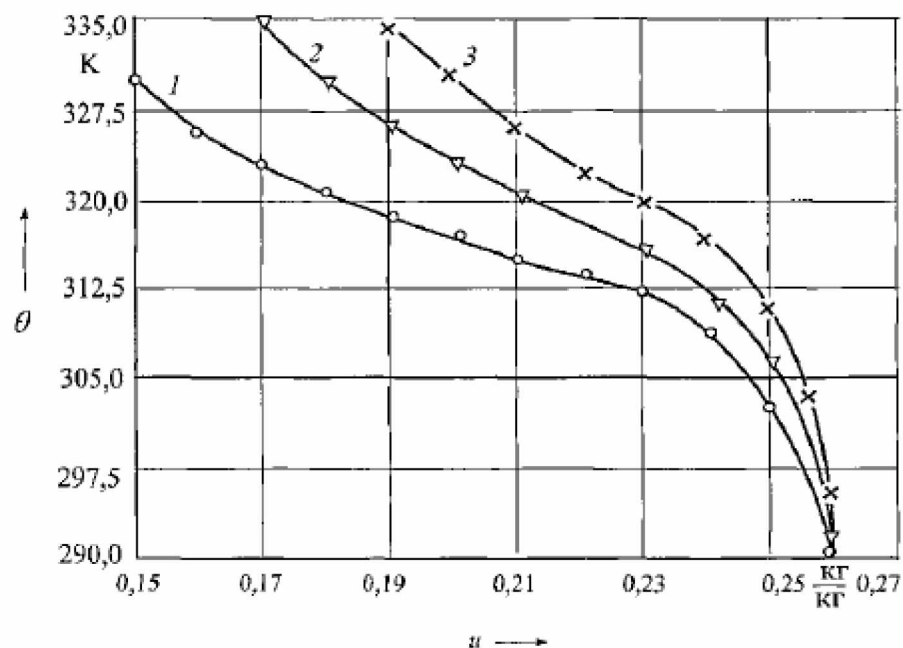


$v = 5,5 \text{ м/с}; u = 0,26 \text{ кг/кг}; x = 0,007$ $v = 5,5 \text{ м/с}; u = 0,26 \text{ кг/кг}; x = 0,007$
 $\text{кг/кг}; T, \text{ К: } 1 - 413; 2 - 423; 3 - 433$ $\text{кг/кг}; T, \text{ К: } 1 - 413; 2 - 423; 3 - 433$

Рисунок 2.2 – Криві нагріву та
сушіння зерна

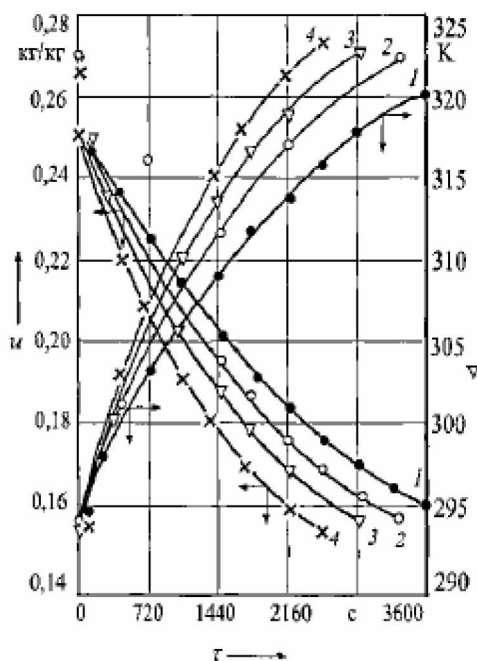
Рисунок 2.3 – Криві швидкості
сушіння зерна

Дана система рівнянь є спрощеною (не враховуються температурні градієнти, термодифузія, розподіл джерела теплоти в самій частинці), але вона досить складна для аналітичного дослідження (через нелінійність) і може бути вирішена лише наближеними обчислювальними методами.



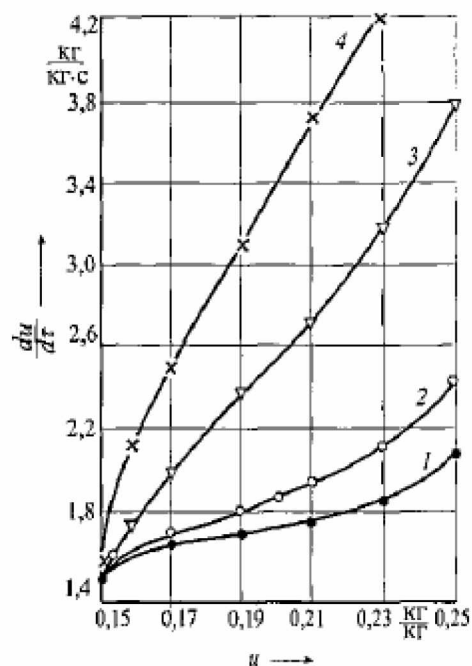
$v = 5,5 \text{ м/с}; u = 0,26 \text{ кг/кг}; x = 0,007 \text{ кг/кг}; T, \text{ К: } 1 - 413; 2 - 423; 3 - 433$

Рисунок 2.4 – Температурні криві



$v = 6,0 \text{ м/с}$; $u = 0,25 \text{ кг/кг}$; $T = 403 \text{ К}$;
 $x \cdot 10^{-3}$, кг/кг: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20

Рисунок 2.5 – Криві нагріву та сушіння зерна



$v = 6,0 \text{ м/с}$; $u = 0,25 \text{ кг/кг}$; $T = 403 \text{ К}$;
 $x \cdot 10^{-3}$, кг/кг: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20

Рисунок 2.6 – Криві швидкості сушіння зерна

Просторовий розподіл поля температури будемо розглядати в декартовій прямокутній системі координат (x, y). Тоді для шару частинок циліндричної форми (для зерна форму приблизно можна вважати циліндричною або сферичною), що рухаються в напрямку осі симетрії X і перехресного (під кутом 90°) руху сушильного агента, всі умови дотримуються і застосовна система рівнянь (2.22) – (2.30).

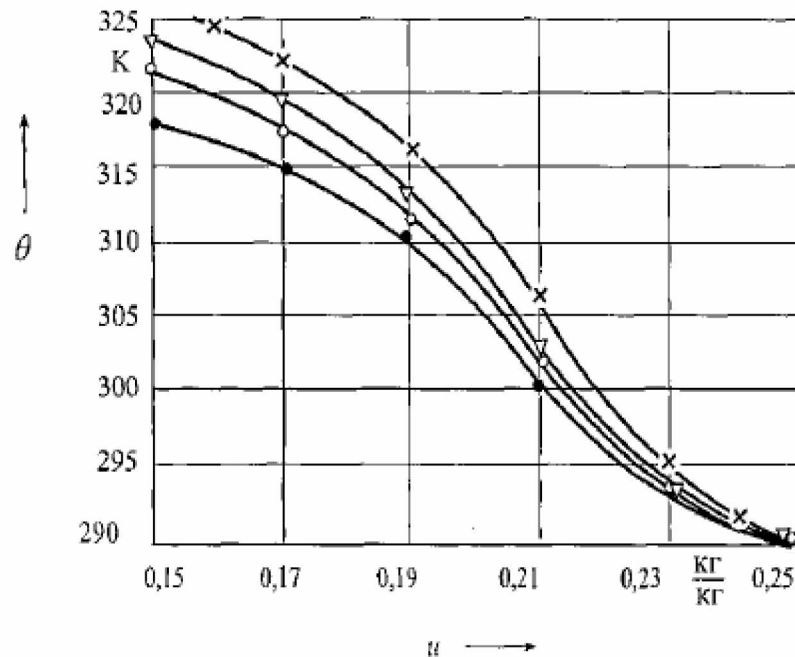
Для розв'язання системи рівнянь використано метод прямих [25]. Відповідно до методу прямих розділимо радіус частинки на n частин і запишемо кінцево-різнісні співвідношення для якої прямої:

$$\frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot Z} = \frac{U_{k+1} - U_{k-1}}{2h}, \quad \frac{\partial^2 \cdot U}{\partial \cdot Z^2} = \frac{U_{k+1} - 2U_k + U_{k-1}}{h^2}, \quad (2.31)$$

де n – кількість прямих; k – номер прямої; h - інтервал по радіусу продукту, що висушується $h = R/n$

$$(\Delta U)_k = \left(\frac{\partial^2 \cdot U}{\partial \cdot Z^2} + \frac{1}{Z} \cdot \frac{\partial \cdot U}{\partial \cdot Z} \right)_k = \frac{U_{k+1} - 2U_k + U_{k-1}}{h^2} - \frac{1}{Z_k} \cdot \frac{U_{k+1} + U_{k-1}}{2h}, \quad (2.32)$$

де $k = 1, 2, \dots, n-1$.



$v = 6,0 \text{ м/с}$; $u = 0,25 \text{ кг/кг}$; $T = 403 \text{ К}$; $x \cdot 10^{-3}$, кг/кг: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4

– 20

Рисунок 2.4 – Температурні криві

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Розробка конструкції зерносховища

При керуванні технологічними властивостями зерна важливе значення приділяється процесам післязбиральної обробки та зберігання зерна. Від кількості та якості зерна залежить забезпеченість сировиною багатьох галузей харчової промисловості. У зв'язку з цим елеваторне господарство повинне в короткі терміни здійснювати прийом та потокову післязбиральну обробку зерна, забезпечувати його повну безпеку. Рациональний вибір режимів сушіння та активного вентилявання дозволяє покращити вихідні

технологічні властивості зерна, підвищити його технологічний потенціал. Так само важливу роль грають умови, у яких здійснюють зберігання зерна. У зв'язку з результатами експериментальних досліджень пропонується конструкція зерносховища для просушування та тривалого зберігання зернових культур, зокрема, зерна пшениці, насіння соняшника, ячменю та ін.

Зерносховище містить послідовно з'єднані та конструктивно однакові секції 1 прямокутного перерізу з опорними стійками 2 (рис. 3.1). У нижній частині кожної секції 1 розташоване двостулкове ситчасте днище 3, під яким встановлений дифузор 4 з патрубками 5 в бокових стінках для подачі теплоносія і заслінкою 18 для вивантаження зерна (рис. 3.2). У його нижній частині змонтований розвантажувальний стрічковий транспортер 6. У місці зіткнення стулок ситчастого днища 3 встановлені з обох боків шиберні упори 8, що виконують функцію фіксаторів горизонтального положення днища 3. Двостулкове ситчасте днище 3 виконано з можливістю консольного відкривання: для цього воно забезпечене валом 7, що здійснює обертання, і шиберними упор.

У двох бокових протилежних стінках виконано кілька паралельних горизонтально розташованих вікон 10. Бічні стінки в місцях розташування вікон 10 виконані перфорованими. З зовнішнього боку кожне вікно забезпечене жалюзі 11. Всі вікна, розташовані на бічній стінці, мають загальний конфузор 12. У верхній частині кожної секції 1 встановлені жалюзі 13, над якими змонтований завантажувальний стрічковий транспортер 14 з самохідним розвантажувальним візком 15, яка забезпечує завантаження відповідну секцію зерносховища.

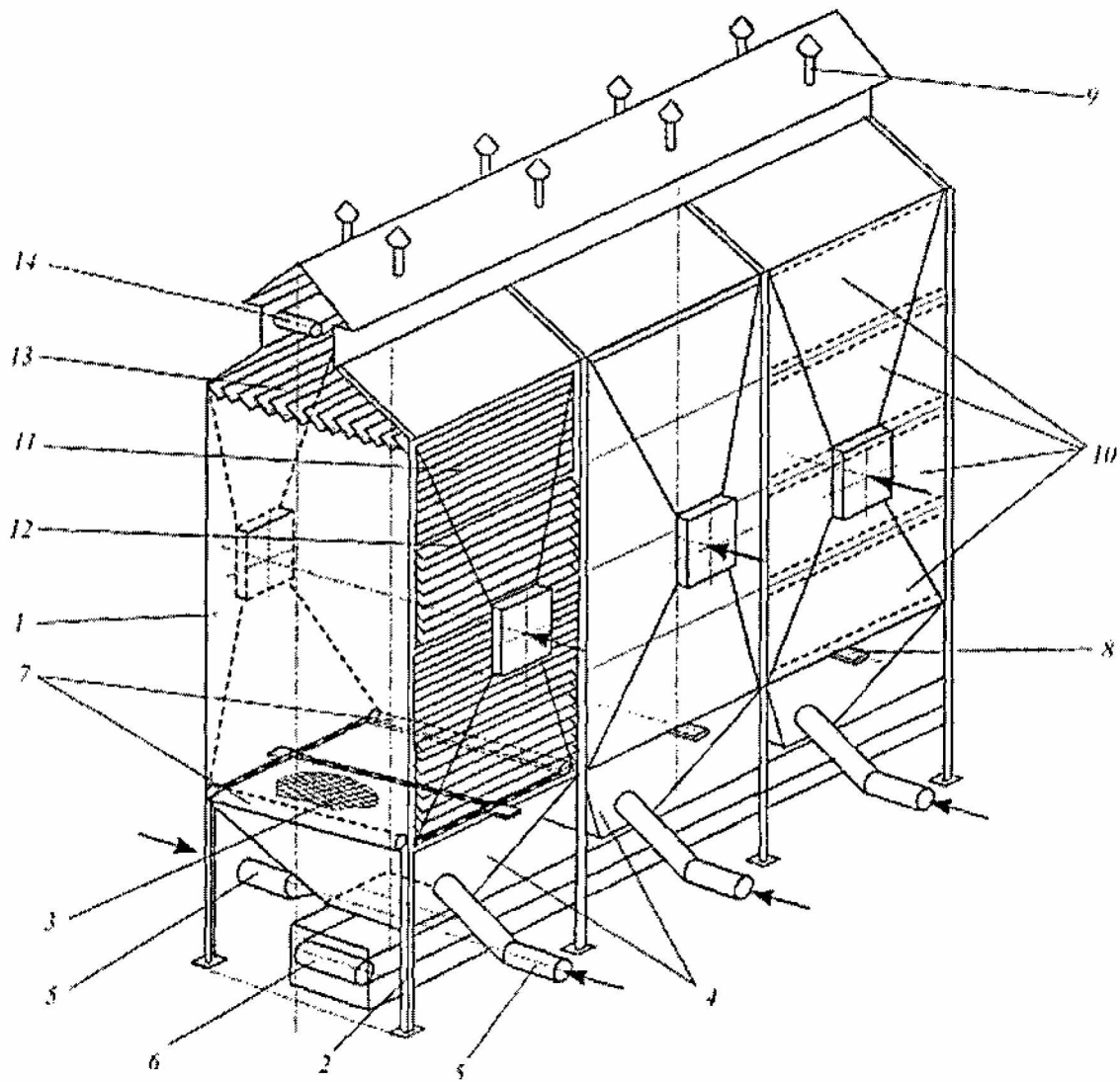


Рисунок 3.1 – Зерносховище

Самохідний розвантажувальний візок 15 являє собою раму 19 на чотирьох колесах 20, електродвигун реверсивний 26, верхній барабан 21, нижній барабан 22, розвантажувальну лійку 23 з двома бічними патрубками 24 (рис. 3.3). Візок 15 переміщається по напрямних 25 за допомогою реверсивного електродвигуна 26, встановленого на рамі 19. Електродвигун-тель 26 за допомогою ремінної передачі 9 приводить у обертання вісь передньої пари коліс 20, змушуючи рухатися візок 15, Стрічка завантажувального транспортера 14 огинає верхній 2 барабани візки 15.

Над завантажувальним стрічковим транспортером 14 встановлений короб з патрубками 17 видалення відпрацьованого теплоносія.

Кожна секція зерносховища оснащена кількома датчиками контролю температури 16 продукту, розташованими з деяким кроком по висоті секції.

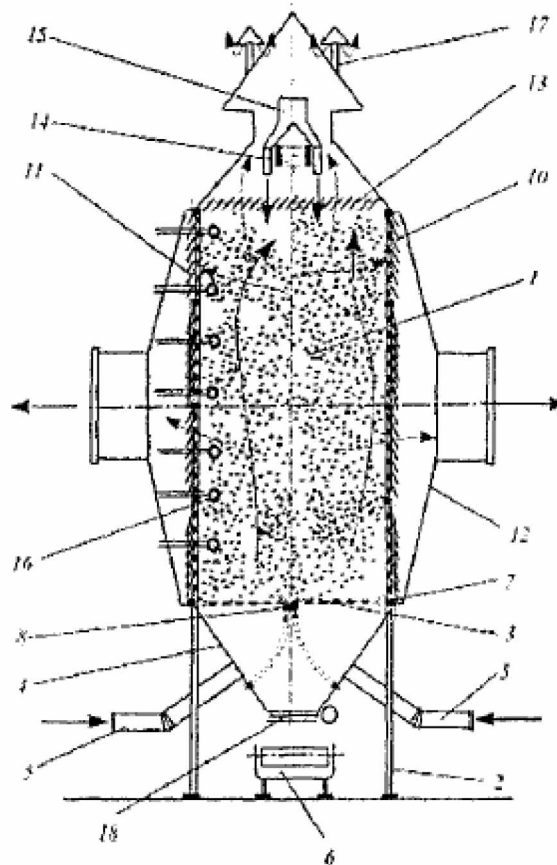


Рисунок 3.2 – Поперечний розріз секції зерносховища

Зерно подається на стрічку транспортера 14. Включається реверсивний електродвигун 26, який за допомогою ремінної передачі 9 приводить у обертання вісь передньої пари коліс 20, переміщуючи візок 15 таким чином, щоб два бічні патрубки 24 опинилися над жалюзі 13 першої секції. Потім електровивагач 26 відключається і візок 15 зупиняється над першою секцією зерносховища. Відкриваються жалюзі 13, встановлені у верхній частині першої секції 1. Двостулкове ситчасте днище 3, що знаходиться в горизонтальному положенні, зафіксовано шибєрними упорами 8. Включається привід (на фіг. не показаний) завантажувального стрічкового транспортера 14 і за допомогою розвантажувального візка 15 зерно ссипа- у розвантажувальну лійку 23, з неї - в два бічні патрубки 24, і потім - через відкриті жалюзі 13 в першу секцію зерносховища на поверхню ситчастого днища 3. Жалюзі 11, встановлені на вікнах 10, закриті.

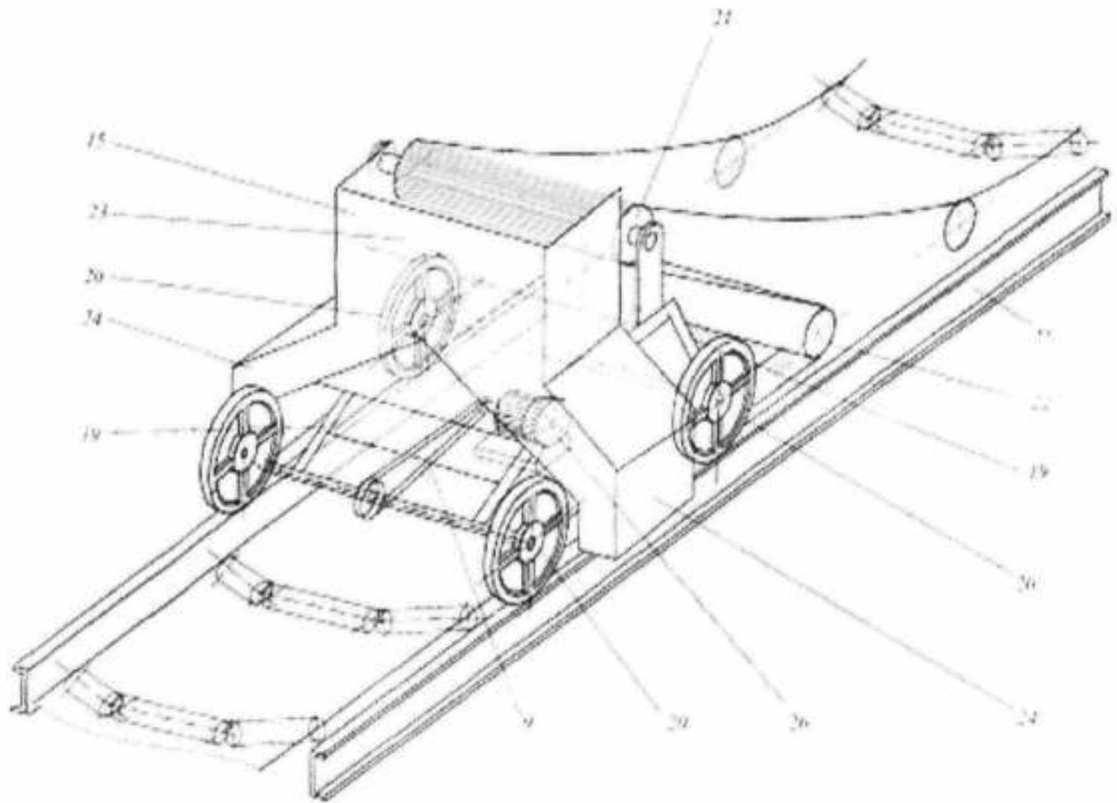


Рисунок 3.3 – Вузол завантажувального стрічкового транспортера з розвантажувальним візком

Після заповнення першої секції зерносховища привід завантажувального стрічкового транспортера 14 вимикається. Включається реверсивний електродвигун 26, який за допомогою ремінної передачі 9 переміщає візок 15, щоб два бічні патрубки 24 опинилися над жалюзі 13 другої секції. Після чого цикл завантаження повторюється раніше описаної послідовності до заповнення всіх секцій зерносховища.

При тривалому зберіганні зерно має тенденцію до самонагрівання, яке може не тільки погіршити якість зерна, що зберігається, але і призвести до його займання.

Як тільки інформація про мимовільне підвищення температури зерна, що зберігається, надходить до оператора, то виконуються наступні операції. Відкриваються жалюзі 11, встановлені на вікнах 10. Жалюзі 13 у цей момент закриті. Через патрубки 5, розташовані в бічних стінках дифузора 4, подається охолоджений і осушений теплоносії (повітря). Нижня заслінка 18 при цьому закрыта. Він пронизує ситчасте днище 3 і шар зерна на ньому,

охолоджує зерно, забираючи при цьому частину вологи з нього. Доходить до відповідного вікна 10, навпроти якого відкриті жалюзі 11, і виходить із секції у загальний конфузор 12, з якого видаляється для подальшої утилізації. Якщо виникає необхідність охолодити і висушити весь обсяг зерна, що знаходиться в першій секції, тоді жалюзі 13 відкриваються, а жалюзі 11 закриваються. У цьому випадку охолоджене та осушене повітря пронизує весь шар зерна в першій секції і видаляється з зерносховища через патрубки 17.

При необхідності вивантаження зерна із зерносховища подача теплоносія припиняється, шиберні упори 8 звільняють двостулкове ситчасте днище 3 і вал 7 здійснює коливальне обертання і стулки ситчастого днища 3 опускаються в нижнє положення. Заслінка 18 при цьому відкривається і зсипається зерно на стрічку розвантажувального транспортера 6, який направляє зерно на подальшу переробку.

Таким чином, пропонуване зерносховище має такі переваги:

- стабілізує температуру та вологість зерна при зберіганні в зерносховищі за рахунок впливу на кратність рециркуляції по сухій фазі залежно від вмісту вологи сушильного агента на вході в сушарку;
- стабілізує температуру та вологість зерна при зберіганні в силах осях за допомогою активного вентилявання кондиціонованим (осушеним та охолодженим повітрям);
- запобігає самогрінню зерна при зберіганні;
- забезпечує підтримку оптимальних параметрів зберігання зерна при зниженні енерговитрат на одиницю маси висушеного зерна на 12 ... 16%.

3.2 Визначення кількості силосів та габаритних розмірів силосного корпусу

У квадратному силосі (рис. 3.4) зерно розміщується у верхній частині по куту природного укосу, а в нижній частині – по куту нахилу днища. Для того, щоб краще врахувати всі місця, що заповнюються зерном, необхідно визначити обсяг верхньої частини V_1 , середньої частини V_2 і нижньої частини V_3 , тоді

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot H_1 (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}), \quad (3.1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{\alpha_1}; \quad \alpha = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad c = e - 2 \cdot \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1},$$

$$S_1 = \left(e - 2 \cdot \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right)^2, \quad S_2 = e^2$$

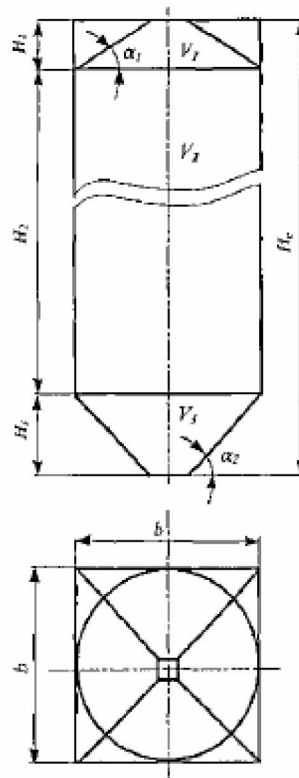


Рисунок 3.4 – Розташування зерна у квадратному силосі

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot H_1 \left[\left(e - 2 \cdot \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right)^2 + e^2 + e \cdot x \cdot \left(e - 2 \cdot \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \right], \quad (3.2)$$

$$V_2 = e^2 \cdot H_2, \quad (3.3)$$

$$V_3 = \frac{1}{3} \cdot H_3 \left[\left(e - 2 \cdot \frac{H_3}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right)^2 + e^2 + e \cdot x \cdot \left(e - 2 \cdot \frac{H_3}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right) \right], \quad (3.4)$$

Місткість бункерів зі сторонами a і b заввишки 6...12 м розраховували за формулою:

$$E = \varphi \cdot F \cdot H \cdot \gamma = 0,8 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 0,75 = 30 \text{ т}, \quad (3.5)$$

де $\varphi = 0,8$ - коефіцієнт використання обсягу бункера; F – переріз бункера, м; H - висота бункера, м; γ – об'ємна маса зерна, т/м³.

Вибір числа силосів та їх розташування (сітка силосів) залежать від необхідної ємності елеватора, мінімального числа над- та підсилосних транспортерів та розміру ділянки для будівництва. Зазвичай силоси розташовуються в три, чотири та шість рядів. У разі будівництва елеватора великої ємності та наявності невеликого будівельного майданчика потрібно переходити до багаторядного розташування силосів. У цьому випадку кількість над- та підсилосних транспортерів збільшується.

Число силосів та габаритні розміри силосних корпусів визначали наступним чином. Розраховавши ємність одного силосу E_{δ} , знаючи необхідну ємність силосного корпусу $E_{c.k.}$, наприклад 60000 тонн, і задавшись числом рядів силосів $n = 4$, знаходили загальну кількість силосів m :

$$m = E_{c.k.} / E_{\delta} = 60000 / 300 = 200. \quad (3.6)$$

Кількість силосів в одному ряду l

$$l = m / n = 200 / 4 = 50. \quad (3.7)$$

Визначали габаритні розміри силосного корпусу:

довжина

$$L_{c.k.} = B_1 \cdot l + \delta = 10,2 \cdot 50 + 0,2 = 510,2, \quad (3.8)$$

Ширина

$$B_{c.k.} = B_1 \cdot n + \delta = 10,2 \cdot 4 + 0,2 = 41,0 \quad (3.9)$$

де B_1 – довжина внутрішньої сторони силосу, м; δ – товщина стін, м.

3.3 Розрахунок пропускної спроможності самопливного зернопроводу

Пропускна здатність зернопроводу залежить від його перерізу, швидкості руху потоку, коефіцієнта заповнення та об'ємної маси зерна.

Самопливний зернопровід складається з круглих, квадратних або прямокутних труб, лотків, розподільних пристроїв, які служать для переміщення зернопродуктів. Розташування секторів, вводів, клапанів та кут нахилу зернопроводу повинні забезпечити нормальне проходження потоку зерна без зниження швидкості та утворення внаслідок цього затору. Швидкість руху зерна у самопливній трубі, у свою чергу, залежить від висоти падіння зерна, кута нахилу, вологості та коефіцієнта тертя зерна. Як показали досліді П.М. Платонова, під час руху зерна в трубах створюється розрідження, створення якого витрачається енергія подає зерна. В результаті швидкість руху зерна по самопливних труб менше швидкості вільного руху твердого тіла по похилій площині. Пропускную здатність зернопроводу розраховували за такою формулою:

$$Q_3 = 3600 \cdot F \cdot v_3 \cdot \varphi \cdot \gamma = 3600 \cdot 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,75 = 216 \text{ т/год}, \quad (3.10)$$

де $F \approx 0,2 \text{ м}^2$ – площа поперечного перерізу труби при середньому діаметрі зернопроводу 250 мм; $v_3 \approx 665 \text{ м/год}$ – середня швидкість руху зернопродуктів, м/год; $\varphi = 0,4$ – коефіцієнт заповнення зернопроводу.

Кут нахилу зернопроводу для зерна пшениці та жита в комунікаціях до зерносушарок слід приймати 45° , на решті комунікації – 35° . Переріз трубопроводів, що транспортують відходи, повинні бути діаметром 140...220 мм, а кути нахилу – 54° .

3.4 Розрахунок потрібного основного технологічного та транспортуючого обладнання для зерносховища

Нехай кількість зерна, що надходить від хлібоздавачів у фізичній масі, становитиме

$$A = A_{\text{залік}} \cdot K_{\phi} = 60000 \cdot 1,06 = 63600 \text{ т}, \quad (3.11)$$

де $K_{\phi} = 1,06$ – коефіцієнт переведення залікової маси у фізичну [25].

Максимальне добове надходження зерна для елеватора з розрахунковим періодом заготовок $\Pi_p = 20$ діб визначали за формулою:

$$a_c = \frac{k \cdot A \cdot K_c}{\Pi_p} = \frac{0,8 \cdot 63600 \cdot 1,6}{20} = 4070,4 \text{ т/доб.}, \quad (3.12)$$

де $A = 63600$ т – кількість зерна, що надходить від хлібоздавачів за весь період заготовок, т; $k = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує надходження зерна протягом розрахункового періоду заготівель; $K_c = 1,6$ – коефіцієнт добової нерівномірності.

Максимальне годинне надходження зерна

$$a_u = \frac{a_c \cdot K_u}{T} = \frac{4070,4 \cdot 1,9}{24} = 322,2 \text{ т/год.}, \quad (3.13)$$

де $K_u = 1,9$ – коефіцієнт годинної нерівномірності надходження зерна, T – розрахунковий час підвезення зерна автотранспортом протягом доби, год.

Вибравши продуктивність транспортного обладнання, наприклад, 350 т/год, визначаємо необхідну кількість ліній прийому зерна з автотранспорту:

$$N_{\text{л}} = \frac{a_u \cdot 1,2}{Q_{\text{л}} \cdot K_{\kappa} \cdot K_{\text{вз}}} = \frac{322,2 \cdot 1,2}{217 \cdot 1 \cdot 0,8} = 2 \text{ шт}, \quad (3.14)$$

де $Q_{\text{л}} = 217$ т/год – продуктивність лінії прийому зерна з автотранспорту визначали в залежності від прийнятої продуктивності транспортного обладнання (350 т/год), середньої вантажопідйомності автотранспорту G_a (10 т) та числа партій $P_{\text{л}}^c$, що надходять на лінію на добу, наприклад $P_{\text{л}}^c = 5$; $K_{\kappa} = 1$ – коефіцієнт, що враховує зниження продуктивності

транспортуючого обладнання при переміщенні культур, з натурою, що відрізняється від пшениці, (для пшениці) прийнятий $K_{\text{вз}} = 0,8$ – коефіцієнт зниження продуктивності транспортуючого обладнання при переміщенні зерна, різного по вологості та засміченості.

Необхідну кількість авторозвантажувачів визначали виходячи з кількості та продуктивності технологічних ліній приймання зерна з урахуванням продуктивності розвантажувачів.

Продуктивність авторозвантажувачів визначали за формулою

$$Q_a = \frac{Q_a^m \cdot K_{\text{л}} \cdot K_{\text{вз}}}{1,2} = \frac{160 \cdot 0,87 \cdot 0,8}{1,2} = 93 \text{ т/год}, \quad (3.15)$$

де $Q_a^m = 160 \text{ т/год}$ – технічна продуктивність автомобілерозвантажувача певної марки, залежно від вантажопідйомності автотранспорту G_a [26]; $K_{\text{л}} = 0,8$ – коефіцієнт зниження продуктивності автомобілерозвантажувача в залежності від продуктивності транспортуючого обладнання лінії, числа партій, що надходять на лінію на добу, та середньої вантажопідйомності автотранспорту, $K_{\text{вз}} = 0,8$ – коефіцієнт зміни продуктивності автомобілерозвантажувача в залежності від стану зерна по вологості та засміченості [26].

Якщо продуктивність розвантажувача $Q_a < Q_{\text{л}}$ слід передбачати встановлення 2 автомобілерозвантажувачів на 1 лінію, тобто за наявності 3 приймальних ліній з продуктивністю транспортуючого обладнання $Q = 350 \text{ т/год}$ необхідно встановлювати 6 автомобілерозвантажувачів У15-УРАГ.

3.5 Сушіння зерна

Обсяг сушіння зерна визначали за формулою:

$$A_c = 0,5 \cdot A \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{к,ср}} \cdot K_{\text{н,ср}} = 0,8 \cdot 63600 \cdot 1,2 \cdot 1 = 61056 \text{ пл.т}, \quad (3.16)$$

де A – кількість зерна, що надійшло на підприємство за весь період заготовок; $K_{\text{в}} = 1,2$ – коефіцієнт переведення фізичних тонн у планові; $K_{\text{к,ср}}$ –

коефіцієнт (середньозважений), що враховує зміну продуктивності зерносушарок в залежності від культури, що просушується, для пшениці $K_{к.ср} = 1$; $K_{н.ср}$ – коефіцієнт, що залежить від призначення культури, що просушується, $K_{н.ср} = 1$.

Кількість сушарок та його продуктивність повинні забезпечити сушіння всіх партій зерна, що надходить у період заготовок $\Pi_p = 20$ сут. При виборі типу та визначенні кількості зерносушарок слід враховувати необхідність своєчасного сушіння партій зерна різних культур, що одночасно надходять. На кожен сушарку доцільно спрямовувати партії зерна однієї культури.

Необхідну кількість зерносушарок, наприклад, серії ДСП-24, з достатньою точністю можна визначити за формулою

$$n = \frac{A_c}{Q \cdot 20,5 \cdot \Pi_p} = \frac{61056}{24 \cdot 20,5 \cdot 20} \approx 6 \text{ сушарок.} \quad (3.17)$$

3.6 Очищення зерна

Необхідну годинну продуктивність зерноочисних ліній визначено з розрахунку роботи цих машин протягом 20 годин на добу.

Приймаємо до встановлення 2 сепаратори А1-БЦС-100. Для очищення зерна від складних домішок передбачаємо встановлення трієрів. Необхідну кількість трієрів визначаємо за формулою

$$N_m = 0,00036 \cdot \frac{A \cdot P_m}{\Pi_p \cdot Q_m} = 0,00036 \cdot \frac{63600 \cdot 10}{20 \cdot 5} = 2 \text{ шт.} \quad (3.18)$$

де A – кількість зерна, що надходить від хлібоздавача за період заготівель, τ (рівно 63 600 т); P_m – кількість зерна, що підлягає очищенню на трієрах, %, $P_m = 10\%$; Q_m – продуктивність трієрів, т/год, $Q_m = 5$ т/год.

3.7 Визначення стану повітря та можливості вентилявання зерна

Перед початком вентилявання зерна визначимо температуру та вологість повітря та зіставимо ці показники з температурою та вологістю зерна, використовуючи номограму ВНПО «Зернопродукти» (рис. 3.5).

Номограма складається з п'яти шкал, розставлених певній відстані друг від друга. Для визначення можливості вентилявання на першій шкалі відзначають температуру, показану сухим термометром психрометра (наприклад 5,5 °С), а на другій - мокрим (припустимо, 4 °С). Через ці дві точки проводять пряму лінію до перетину з третьою шкалою, точка перетину з часом вкаже абсолютну вологість повітря (у прикладі 5,5 г/м³). Знаючи температуру та вологість повітря, а також температуру та вологість зерна, визначають можливість вентилявання. При цьому використовують ті ж номограми в такий спосіб.

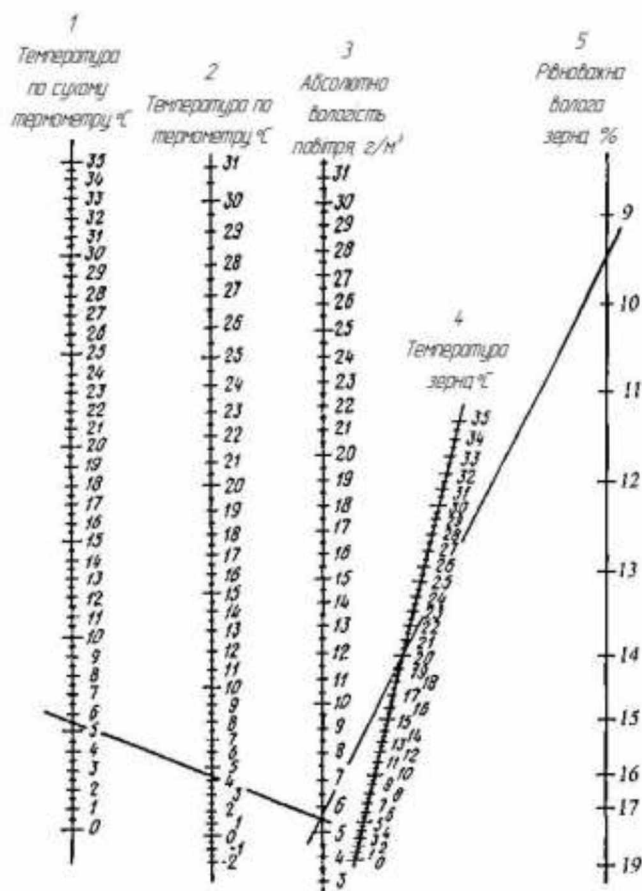


Рисунок 3.5 – Номограма для определения влажности воздуха и возможности вентилирования зерна при температуре воздуха выше 0 °С

На четвертій шкалі наносять точку, яка відповідає температурі зерна. Потім через цю точку та точку, раніше отриману від перетину проводять другу пряму до перетину з п'ятою шкалою. Точка перетину з нею вкаже рівноважну вологість зерна, тобто ту вологість, якої зернова маса прагнучиме при вентильованні. У нашому випадку вона дорівнює 94%. Це означає, що при зазначеному стані зовнішнього повітря (температурі 5,5 °С та абсолютній вологості 5,5 г/м³) можна вентильовати зерно, температура якого 20 °С і вище, а вологість більше 9,4 %. При цьому поряд ізохолодженням відбуватиметься підсушування зерна. Питомі подачі повітря при вентильованні сирого та вологого зерна повинні бути такими, яких зниження температури зерна або його підсушування виключали б можливість розвитку цвілевих грибів і мікроорганізмів, а також сприяло підвищенню стійкості зерна. Середня питома подача повітря q_{cp} [м³/(год·т)],

$$q_{cp} = V_v / M_z, \quad (3.19)$$

де V_v – витрата повітря, м/год; M_z – маса вентильованого зерна, т.е.

Тривалість вентильовання шару зерна визначається періодом обробки застійних зон, тому практичний інтерес представляє коефіцієнт питомої подачі повітря K_q для застійної зони.

Таким чином, для вентильовання всього шару зерна з урахуванням застійних зон потрібна велика середня питома подача повітря, яка може бути врахована коефіцієнтом потреби у питомій подачі повітря Π .

$$\Pi = 1 / K_q, \quad (3.20)$$

де K_q – коефіцієнт питомої подачі повітря для застійної зони.

Масова частка повітря для активного вентильовання зерна,

$$V_v = q_n \cdot \Pi \cdot M_z, \quad (3.21)$$

де q_n – норма питомої подачі повітря для застійної зони, м/(год·т), приймають за довідковими даними.

Якщо вологість зерна при активному вентиляванні не змінюється, тобто процес охолодження не супроводжується випаровуванням або конденсацією вологи, то рівняння теплового балансу може бути записане як

$$V_{\epsilon} \cdot c_p \cdot \Delta t = M_z \cdot c_z \cdot \Delta \theta, \quad (3.22)$$

де c_p – питома теплоємність повітря при постійному тиску; $c_p = 1,26$ кДж/(м $\cdot$ °C); Δt – підвищення температури повітря при проходженні через зерновий насип, °C; c_z – питома теплоємність зерна; при вологості 20% $c_z = 2,09$ кДж/(кг $\cdot$ °C); $\Delta \theta$ – зниження температури зерна, °C.

В випадку $\Delta t = \Delta \theta$

$$q_{yd} = \frac{V_{\epsilon}}{M_z} = \frac{c_z}{c_p} = \frac{2,09}{1,26} = 1,67 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (3.23)$$

т. е. на охолодження без підсушування 1 т зерна потрібно 1670 м 3 повітря.

Тривалість охолодження τ зерна до моменту виходу зони охолодження на поверхню насипу визначиться як

$$\tau = k_1 \cdot \Pi \cdot q_{yd} / q_n = 1,2 \cdot 1670 \cdot 1,34 / 100 = 25,5 \text{ год}, \quad (3.24)$$

де k_1 – коефіцієнта потреби у питомій подачі повітря для застійної зони ($k_1 = 1,2$); $q_{yd} = 1,34$ – коефіцієнт подачі повітря для застійних зон при висоті насипу 32 м; $q_n = 100$ м 3 /(год $\cdot$ т) – норма питомої подачі повітря для застійних зон при початковій вологості зерна W -25%.

Таким чином, тривалість вентилявання зерна з метою його охолодження до температури, близької до температури повітря, в даному випадку складе приблизно 26 год. Терміни вентилявання встановлюються в залежності від температури та вологості зерна.

При вентиляванні дуже важливо правильно підібрати вентилятор. Його продуктивність визначають за характеристикою, яка залежить від типу вентилятора і швидкості обертання робочого колеса, і за характеристикою мережі, яка залежить від конструкції вентиляційної установки та її розмірів, виду зернової культури, висоти та ущільненості зернового насипу, стану зерна, його крупності та ін.

На основі виробничих вимірювань та даних про аеродинамічний опір зернового шару різних культур В.С. Уколовим розрахована приблизна фактична продуктивність вентиляторів. Наведені дані показують, що вибираючи відповідний вентилятор, можна змінювати питому подачу повітря в значних межах.

3.8 Розробка способу стабілізації термовологих характеристик зерна при його сушінні та зберіганні

Для підвищення ефективності зберігання зернового запасу необхідна реалізація сукупності технічних прийомів та методів, а також засобів управління технологічними параметрами, які забезпечують стабілізацію термовологих характеристик при сушінні та зберіганні зерна в силосах за рахунок оперативного попередження процесів самозігрівання зернової маси за допомогою активного вентилявання холодним повітрям.

З цією метою за результатами виконаних досліджень пропонується спосіб стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні з використанням теплонасосної установки.

Спосіб стабілізації термовологих характеристик зерна може бути використаний при автоматизації процесів сушіння та зберігання зернових культур, зокрема, зерна пшениці, насіння соняшника, солоду та ін.

Схема (рис. 3.6), що реалізує пропонований спосіб, містить рециркуляційну шахтну зерносушарку 1 із зонами теплолаогообміну 2, сушіння 3 та охолодження зерна 4; камеру нагрівання 5; калорифер 6; циклон 7; вентилятори 8, 9, 10; силоси 11; норії 12, 13; компресор теплонасосної установки 14; конденсатор з секціями 15 та 16; випарник з секціями 17 та 18; терморегульований вентиль 19; розподільники потоку 20 та 21; лінії; подачі вологого 22 і рециркульованого 23 зерна в зону тепломасообміну 2, відведення висушеного зерна 24 на зберігання в силоси 11, рециркуляції сушильного агента 25, подачі осушеного і охолодженого сушильного агента

26 на активне вентилявання зерна в 27, 28, подачі свіжого повітря 29 в зону охолодження зерна 4, відведення відпрацьованого повітря 30 із зони охолодження 4 в секцію конденсатора 16, подачі повітря 31 після конденсатора у випарник, відведення конденсату 32 з секцій випарника 17 і 18, подачі пари 33 калорифер 6, відведення конденсату 34 з калорифера 6, 35 з циклону 7, рециркуляції холодоагенту 36 теплонасосної установки; датчики: температури 37 – 45; вологості 46 – 48; вміст води 49 – 51; витрати 52 – 58; виконавчі механізми 59 – 75; мікропроцесор 76; (а, б, в, г, д, е, ж, з, і, до, л, м, н, о, п, р, с, т, у, ф, х, ц – вхідні канали управління; А, Б, В, Р, Д, Е, Ж, З, І, К, Л, М, Н, О, П, Р, С - вихідні канали управління).

Вологе зерно послідовно подають спочатку в теплообмінник 5, де воно нагрівається за рахунок теплоти відпрацьованого сушильного агента, потім в зону тепловлагообміну 2 рециркуляційної сушарки 1, в якій за рахунок змішування вихідного вологого і рециркуляційного висушеного потоків зерна відбувається перерозподіл теплоти і води між сухими зернами шляхом контактної теплоадагопереносу (сорбційне сушіння вологого зерна), а також вирівнювання температури та вологості по всьому об'єму зернової суміші вологого зерна з рециркульованим. Після зони тепловлагообміну 2 зернову суміш поділяють на два потоки, кожен з яких надходить в зону сушіння 3 і продувається сушильним агентом, внаслідок чого вологість зерна знижується. По одному потоку висушене зерно охолоджують свіжим (зовнішнім) повітрям по лінії 29 в зоні охолодження 4 і за допомогою норії 13 по лінії 24 подають на зберігання силоси 11. По іншому рециркулюючого потоку за допомогою норії 12 висушене зерно знову змішують з вологим зерном і повторно направляють у цикл теплоадагопереносу. Відпрацьований сушильний агент після попереднього підігріву вологого зерна в теплообміннику 5 направляють в циклон 7 для очищення від зважених твердих частинок, що містяться в ньому, які відводяться з циклону по лінії 35. Очищений сушильний агент за допомогою розподільника потоку 20 направляють на осушення теплонасосної установки, що працює в режимі

конденсації. Осушений і охолоджений сушильний агент за допомогою розподільника 21 поділяють на два потоки, один з яких подають на активне вентилявання зерна в силоси 11 по лінії 26, а інший на сушіння зерна по лінії рециркуляції 25, з підживленням кожного потоку свіжим повітрям відповідно по лініях 27 і 28. Перед подачею суміші сушильного агента і свіжого повітря на сушіння її підігрівують у секції 15 двосекційного конденсатора теплонасосної установки за рахунок теплоти конденсації холодоагенту, а потім в калорифері 6. Свіже повітря вентилятором 1 29 спочатку подають в зону охолодження зерна 4 рециркуляційної сушарки 1, а потім відпрацьоване повітря після охолодження зерна по лінії 30 подають у секцію 16 двосекційного конденсатора і далі по лінії 31 направляють на розморожування резервної секції 18 випарника теплонасос.

Процес конденсації вологи, що міститься в сушильному агенті, супроводжується утворенням «снігової шуби» на охолоджувальному елементі випарника, що призводить до зниження коефіцієнта теплопередачі від холодоагенту до сушильного агента через стінку охолоджуючого елемента при наростаючій по ходу процесу сушіння товщини «сніжної шуби», як наслідок, знижує інтенсивність осушення сушильного агента.

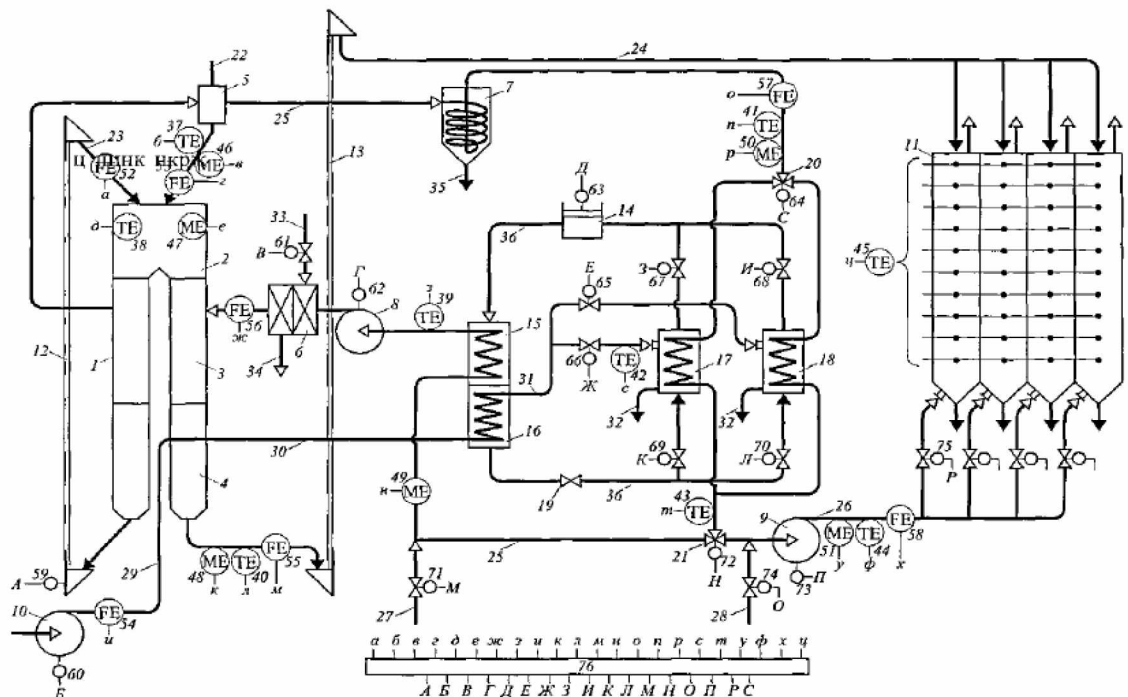


Рисунок 3.6 – Схема стабілізації термовологісних характеристик зерна при його сушінні та зберіганні

За інформацією датчиків 41, 42, 43, 57 мікропроцесор безперервно обчислює поточне значення коефіцієнта теплопередачі за формулою:

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}}, \text{ год}, \quad (3.25)$$

де $Q = V \cdot c_{ca} \cdot \rho_{ca} \cdot (t_1 - t_2)$ – кількість теплоти, що подається сушильним агентом у випарник теплонасосної установки, кДж/год; V – об'ємна витрата сушильного агента, м³/год; c_{ca}, ρ_{ca} – середні значення теплоємності, кДж/(кг·К), щільності, кг/м³, сушильного агента; F – площа поверхні охолоджуючого елемента випарника, м²; $\Delta t_{cp} = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - t_3) / (t_2 - t_3)]$ – середньологарифмічний температурний напір, С; t_1, t_2 – температура сушильного агента відповідно на вході та виході з випарника, С; t_3 – температура холодоагенту на вході у випарник, С, і виробляє сигнал відхилення поточного значення коефіцієнта теплопередачі від заданого інтервалу значень, за яким коригує співвідношення витрат «сушильний агент - холодоагент» шляхом зміни витрати холодоагента в лінії рециркуляції 36 впливом на потужність приводу компресора 14 за допомогою виконавчого механізму 63. поточного значення коефіцієнта теплопередачі від заданого у бік зменшення, мікропроцесор збільшує холодопродуктивність теплонасосної установки. Якщо збільшення холодопродуктивності (витрати холодоагенту в лінії 36) не дозволяє вивести поточне значення коефіцієнта теплопередачі на заданий інтервал значень, то мікропроцесор 76 за допомогою виконавчих механізмів 66, 67і 69 відключає робочу секцію 17 випарника з контуру рециркуляції 6 механізмів 65, 68, 70 резервну секцію 18 в контур рециркуляції 36 на режим конденсації. Роботу виконавчих механізмів 65, 66, 67, 68, 69, 70 синхронізовано. При цьому розподільник потоку 20 за допомогою виконавчого механізму 64 перемикає потік

сушильного агента, що подається на осушення, робочу секцію випарника 18, що переключилася з режиму регенерації на режим конденсації.

Після осушення та охолодження в робочій секції випарника теплонасосної установки сушильний агент за допомогою виконавчого механізму 72 розподільника потоку 21 поділяють на два потоки, один з яких подають на активне вентилявання зерна в силоси, а інший на сушіння зерна, з підживленням кожного потоку свіжим повітрям відповідно лініях 28 і 27. Мікропроцесор 76 безперервно контролює температуру в різних перерізах зернової маси по висоті силосів 11. При зберіганні зерна в ньому протікають фізіологічні процеси, що супроводжуються виділенням теплоти. У результаті температура зерна може досягти значення, при якому може відбутися погіршення комерційних, технологічних і харчових властивостей зерна. Тому передбачено своєчасне визначення будь-якого перегріву під час зберігання та охолодження зерна за рахунок активного вентилявання. При зберіганні у замкнутах обсягах (у силосах або бункерах) на початкових стадіях може бути пошкоджена лише невелика частина зерна, що зберігається. Однак така небезпека, що має на початкових стадіях локальний характер, за відсутності своєчасного контролю може поширитися на інші області зерна, що зберігається. Тому для збереження якості зерна при його тривалому зберіганні силосах 11 температура зерна зчитується на значній кількості точок вимірювання за допомогою датчиків 45.

При відхиленні поточної температури зерна в будь-якій з точок вимірювання зернової маси, що зберігається в силосах 11 від заданого значення у бік збільшення, осушений і охолоджений сушильний агент після робочої секції випарника теплонасосної установки використовують за допомогою лінії 26 для охолодження та активного вентилявання зерна. В залежності від кількості зернової маси в силосі 11 мікропроцесор 76 встановлюють заданий витрата суміші осушеного сушильного агента і свіжого повітря, що подається вентилятором 9 на активне вентилявання зерна, поточне значення якої контролюється датчиком 58 лінії 26. За

поточними значеннями вологовмісту і температури суміші осушеного і свіжого повітря, вимірюваних відповідно датчиками 51 і 44, мікропроцесор 76 визначає відповідно до $J-d$ діаграмою вологого повітря відносну вологість суміші. Відносна вологість є важливим фактором, що впливає на зберігання зерна. При цій температурі низька і висока відносна вологість може призвести до погіршення якості зерна. Відносна вологість, коли починається псування зерна, залежить від температури. Тому за інформацією про температуру зерна в будь-якій з точок вимірювання зернової маси, що зберігається в силосах 11, мікропроцесор 76 коригує співвідношення витрат охолодженого сушильного агента і свіжого повітря в лінії 26 за допомогою виконавчих механізмів 72 і 74. Як тільки температура зерна досягає рівності або стає нижче заданого значення, то мікропроцесор 76 припиняє активне вентилявання зерна і весь потік осушеного і охолодженого сушильного агента за допомогою розподільника 21 і та виконавчого механізму 72 подається в контур рециркуляції сушильного агента 25.

У процесі сушіння мікропроцесор 16 здійснює безперервний контроль за вологовмістом суміші осушеного (охолодженого) сушильного агента і свіжого повітря в лінії 25. При активному вентиляванні зерна співвідношення складових цієї суміші, що подається на сушіння вентилятором 8, неминуче змінюватися, тому мікропроцесор 76 залежно від вологості висушеного зерна, що вимірюється датчиком 48 в лінії 24 відведення зерна на зберігання в силоси 11, а в залежності від вмісту вологи суміші осушеного (охолодженого) сушильного агента і свіжого повітря мікропроцесор встановлює кратність рециркуляції по висушеному зерну (вологого зерна, що подається на сушіння) впливом на витрату рециркулююмого зерна за допомогою виконавчого механізму 59 регульованого приводу норії 12. Причому при зменшенні вмісту вологи вмісту, що подається на сушіння мікропроцесор 76 збільшує продуктивність сушарки 1 по волог ному зерну за рахунок зниження витрати зерна, що рециркулюється.

При відхиленні поточного значення вологості висушеного продукту від заданого, що пояснюється можливими випадковими обуреннями або через істотні коливання складу вологого зерна, і в першу чергу його вологості, або через технологічні збої, пов'язані з підсмоктуванням в тракті подачі зерна на сушіння в лінії 22, а також лініях рециркуляції сушильного агента, мікропроцесор 76 здійснює корекцію режиму сушіння і за допомогою виконавчих механізмів 61 і 62 впливає на зміну температури та витрати суміші сушильного агента та свіжого повітря на вході в сушарку шляхом зміни витрати пари в калорифері 6 та потужності приводу вентилятора 8.

Розглянемо реалізацію запропонованого способу стабілізації термовлажностних характеристик зерна з прикладу сушіння зерна пшениці продовольчого призначення шахтній рециркуляційної зерносушарці ДСП-24сн з подальшим тривалим зберіганням у металевому зерносховищі з аерозелобами для активного вентилявання.

Межі регулювання температури та витрати повітря на вході в сушарку обґрунтовані в літературі і відповідно становлять: 373...413 К; 27800...45900 м³/год.

Для початкової вологості зерна пшениці з міцною та гарною клейковиною вище 20 % використовується двоступінчастий режим позонної сушіння при температурі сушильного агента 373...393 К у першій зоні та 403...413 у другій. При кратності рециркуляції по сухому зерну в інтервалі значень 0,3...0,4 вологість зерна знижується до стандартного значення 14 % і не перевищує гранично допустимої температури нагрівання зерна 318...323 К. Температура зерна на виході з охолоджувальної камери вбирається у температуру зовнішнього повітря більш ніж 281...283 К.

Для тривалого та надійного зберігання, що забезпечує необхідні аеробні умови та запобігає псуванню продукту, у способі запропонована аерація зерна сумішшю атмосферного та кондиціонованого повітря при потоці 0,1...0,3 м³/хв на кубічний метр зернової маси при будь-якій тривалості періоду аерації в залежності від температури зерна.

Для підготовки кондиціонованого повітря до подальшого сушіння та зберігання зерна в лінії рециркуляції сушильного агента 25 встановлена теплонасосна установка з наступними технічними даними:

Холодопродуктивність, кВт	30...40
Холодоагент (фреон-12)	R12
Тип компресора	поршневий одноступінчастий
Температура холодоагенту на вході у випарник, К	263...273
Площа охолоджуючої поверхні випарника, м ²	6 8,9
Допустима товщина снігової шуби, мм.	16±0,5
Допустимі межі зміни коефіцієнта теплопередачі, кВт/(м ² ·К)	5,8...8,0

За допомогою датчиків 37, 46, 53 інформація про поточну продуктивність сушарки по вологому зерну, наприклад 24 т/год, та його температурі після попереднього нагріву в камері 5, наприклад 301 К, передається в мікропроцесор 76, який за закладеним в нього алгоритмом встановлює витрату повітря, наприклад, у першій зоні сушіння 45900 м³/год та у другій зоні 27800 м³/год (на рис.3.4 умовно показана одна зона сушіння).

Відпрацьоване повітря після першої та другої зон сушіння, віддавши частину своєї теплоти на підігрів вологого зерна в теплообміннику 5 з температурою, наприклад 314 К, направляють по лінії рециркуляції 25 циклон, а потім в робочу секцію випарника теплонасосної установки, що працює в режимі конденсації. За рахунок конденсації вологи з сушильного агента в снігову шубу на охолоджувальній поверхні робочої секції випарника забезпечується зниження його вмісту вологи, наприклад, до 0,001...0,005 кг/кг, з яким він подається в лінію рециркуляції 25 і в лінію 26 на лінію зерна, що зберігається в силосах 11. При відхиленні температури зерна в силосах від заданого значення, наприклад 293 К, у бік збільшення мікропроцесор встановлює співвідношення витрат осушеного

(охолодженого) сушильного агента і свіжого повітря в лінії 26, при якому відносна вологість суміші, що подається на активну вентиляцію для заданої температури зберігання зерна забезпечували б уповільнення фізіологічних процесів, що супроводжуються виділенням тепла. Безперервне зчитування температури зерна в різних точках вимірювання може бути забезпечене різними пристроями, наприклад, термометричними датчиками з аналоговими індикаторами та програмованим управлінням із заданим часовим інтервалом вимірювань.

Щоб запобігти псуванню, викликаному паразитами та пліснявою, зерно при аерації необхідно швидко довести до необхідної температури. Тривалість періоду аерації встановлюється мікропроцесором залежно від висоти силосу, наприклад, 30...45 хв. Після вентиляції зчитування температури не припиняється, за необхідності коригуючи отримані значення з урахуванням температури суміші осушеного (охолодженого) та свіжого повітря, що подається на вентиляцію. Якщо отримані результати показують завищення температури приблизно на 2...5 °С, можна припустити, що у масі зерна є осередки нагріву, є небезпека ушкодження і активне вентиляцію повторюється. Якщо температура зерна в точках вимірювання знаходиться в області заданих значень, відповідних відносній вологості навколишнього середовища, активне вентиляцію припиняється і весь потік осушеного і охолодженого сушильного агента подається на сушку зерна через секцію 15 конденсатора теплонасосної установки. Підвищення температури суміші осушеного (охолодженого) сушильного агента та свіжого повітря перед конденсатором дозволяє знизити теплове навантаження на калорифер 6.

За інформацією датчика 49 про поточну витрату повітря на вході в зерно-сушарку 1 мікропроцесор 16 коригує співвідношення витрат осушеного (охолодженого) і свіжого повітря в лінії 25 шляхом зміни витрати повітря в лінії підживлення 27. При цьому вміст вологи вмісту осушеного (охолодженого) сушильного агента і свіжого повітря на вході в сушарку може змінюватися в інтервалі значень, наприклад 0,003...0,015 кг/кг, в

залежності від яких мікропроцесор впливає на кратність рециркуляції по висушеному зерну (відношення витрати сухого зерна, що рециркулюється, повертається на сушіння норією 12, витрати вологого зерна, що подається на сушіння по лінії 22).

Найбільший сушильний потенціал суміші забезпечується при малих значеннях її вмісту води, наприклад, 0,003...0,005. У цьому випадку досягається максимальна величина напруги сушильної камери по випареній воді (кількість випаровуваної води з одиниці об'єму сушильної камери в одиницю часу), наприклад, 22,4...24,2 кг/м³·год, що дозволяє знизити витрату рециркулюємого зерна, а отже зменшити кратність рециркуляції по сухій фазі та підвищити продуктивність сушарки по висушеному зерну.

При високому вмісті води суміші, наприклад 0,013...0,15 кг/кг, вологонапруга сушильної камери знижується і становить, наприклад 20,5...21,2 кг/(м³·год), що не дозволяє довести кінцеву вологість зерна до 14%. Тому збільшують витрату зерна, що рециркулюється, стабілізуючи термовлажностные характеристики зернової суміші в зоні тепловлагообміну рециркуляційної сушарки і здійснюючи процес сушіння з високими техніко-економічними показниками.

Таким чином, пропонується спосіб стабілізації термовлажностных характеристик зерна при сушінні та зберіганні має наступні переваги:

- дозволяє ефективно використовувати потенціал сушильного агента в теплонасосних сушильних установках з метою максимального використання вторинних енергоресурсів;
- забезпечує реалізацію невикористаних резервів рекуперації теплоти висушеного зерна для нагрівання відпрацьованого повітря, що використовується для розморожування випарника теплонасосної установки;
- стабілізує температуру і вологість зерна при сушінні в шахтних рециркуляційних зерносушарках за рахунок впливу на кратність рециркуляції по сухій фазі в залежності від вологого вмісту сушильного агента на вході в сушарку;

- стабілізує температуру та вологість зерна при зберіганні в силосах за допомогою активного вентилявання сумішшю кондиціонованого (осушеного та охолодженого повітря) та свіжого повітря, що забирається з атмосфери;
- запобігає самогрінню зерна при зберіганні;
- забезпечує зниження теплових навантажень на конденсатор та випарник теплонасосної установки, що дозволяє знизити енерговитрати на одиницю маси висушеного зерна на 10...15 %.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Екологічна експертиза

Екологічна експертиза в Україні – вид науково-практичної діяльності спеціально уповноважених державних органів, еколого-експертних формувань та об'єднань громадян, що ґрунтується на міжгалузевому екологічному дослідженні, аналізі та оцінці перед проектних, проектних та інших матеріалів чи об'єктів, реалізація і дія яких може негативно впливати або впливає на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей, і спрямована на підготовку висновків про відповідність та планованої чи здійснюваної діяльності нормам і вимогам законодавства про охорону навколишнього середовища, раціональне використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки [27].

Відносини в галузі екологічної експертизи регулюються Законом України «Про екологічну експертизу» (9.02.95р.).

Завданням законодавства про екологічну експертизу є регулювання суспільних відносин в галузі екологічної експертизи для забезпечення екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, захисту екологічних прав та інтересів громадян і держави.

Метою екологічної експертизи є запобігання негативному впливу антропогенної діяльності на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей, а також оцінка ступеня екологічної безпеки господарської діяльності та екологічної ситуації на окремих територіях і об'єктах.

Основними завданнями екологічної експертизи є:

1) визначення ступеня екологічного ризику і безпеки запланованої чи здійснюваної діяльності; 2) організація комплексної, науково обґрунтованої оцінки об'єктів екологічної експертизи; 3) встановлення відповідності об'єктів експертизи вимогам екологічного законодавства, санітарних норм, будівельних норм і правил; 4) оцінка впливу діяльності об'єктів екологічної експертизи на стан навколишнього природного середовища, здоров'я людей і якість природних ресурсів; 5) оцінка ефективності, повноти, обґрунтованості та достатності заходів щодо охорони навколишнього природного середовища і здоров'я людей; 6) підготовка об'єктивних, всебічно обґрунтованих висновків екологічної експертизи [27, 28].

4.2 Охорона праці

В Україні виникають щорічно тисячі важких надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, в наслідок яких гине велика кількість людей, а матеріальні збитки сягають кількох мільярдів гривень. Нині в багатьох областях України у зв'язку з небезпечними природними явищами, аваріями і катастрофами обстановка характеризується як дуже складна.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях в умовах сільськогосподарського виробництва – важливе завдання, вирішення якого забезпечить нормальні умови праці працівниками сільського господарства. Це заходи по подальшому поліпшенню і оздоровленню умов праці, широкому впровадженню сучасних засобів безпеки, усуненню причин, що породжують травматизм, створенню на виробництві необхідних гігієнічних і санітарно-побутових умов.

Охорона праці в нашій країні охоплює заходи по подальшому полегшенню умов праці на основі механізації важких і шкідливих виробничих процесів, широкому впровадженню сучасних засобів охорони праці, усуненню причин, що породжують травматизм і професійні захворювання робітників. Вона тісно пов'язана з умовами праці [30].

Умови праці – характеризуються оціночними показниками мікроклімату, наявністю в робочій зоні шкідливих та небезпечних виробничих факторів, психофізичним та естетичними елементами діяльності працівників господарства.

4.3 Обґрунтування економічної доцільності технології стабілізації термовологих характеристик зерна при сушінні та зберіганні

У даному розділі розглядається питання економічного обґрунтування доцільності впровадження технології стабілізації термовологих характеристик зерна при його сушінні у шахтній зерносушарці ДСП-16 та тривалому зберіганні у силосах прямокутної форми з організацією періодичного активного вентилявання зерна кондиціонованим повітрям.

Розрахунок економічної ефективності запропонованих заходів виконано на основі фактичних даних про вантажообіг елеватора (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Дані про вантажообіг елеватора

Місяць	Залишок на кінець місяця, т	Приймання зерна		Відпуск зерна, т			Залишок на кінець місяця, т
		Заготівля	Різні надходження	На ж/д транспорт	На автотранспорт	На підприємства	
1	45967,65	-	375,81	-	-	1950,67	44392,78
2	44392,78	-	1170,55	-	-	2043,54	43519,79
3	43519,79	-	982,36	7465,32	-	2070,02	34966,81
4	34966,81	-	2640,72	8324,54	-	1985,46	27297,53
5	27297,53	-	1467,43	3569,52	-	1996,34	23199,10
6	23199,10	-	5743,32	5367,29	3654,22	1937,40	17983,51
7	17983,51	1500,82	7495,75	1365,87	-	2012,36	23601,85
8	23601,85	3520,73	5100,65	3568,53	1256,32	2000,75	25397,63
9	25397,63	5370,56	2637,33	3741,69	-	1983,66	27680,17
10	27680,17	2740,58	6120,74	-	-	1998,63	34542,86
11	34542,86	-	8952,47	-	-	2009,56	41485,77
12	41485,77	-	6366,65	-	-	1854,77	45967,65
Разом	390035,5	-	49023,77	33402,76	4910,54	23843,16	3900035,5

Як очевидно з даних табл. 4.1, пік прийому зерна припадає на час збирання зернових у сільськогосподарських підприємствах регіону (початок липня – кінець жовтня). У цей період основне завдання елеватора полягає у здійсненні робіт з приймання, сушіння, очищення, розміщення зернових

культур за силосами та складами та їх зберігання з проведенням активного вентилявання.

З даних табл. 4.1 складається річний календарний план робіт із зерном, у якому зазначаються основні види робіт, які проводяться із зерном протягом року. Слід зважити на той факт, що активне вентилявання зерна проводиться цілий рік, тому в календарному плані робіт воно не вказано. Обсяг зерна, що знаходиться на зберіганні, розраховується з урахуванням середніх місячних показників його надходження та реалізації. Сушіння основних обсягів зерна, що надходить, виробляється в період надходження зерна нового врожаю (липні-жовтні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Календарний план роботи з зерном

Місяць	Підготовчі роботи із зерном, т		
	зберігання	сушка	відправка
Січень	45180	-	1951
Лютий	43956	-	2044
Березень	39243	-	9535
Квітень	31132	-	10310
Травень	25248	-	5366
Червень	20591	-	11335
Липень	20793	8997	3378
Серпень	24500	8621	6826
Вересень	26539	8008	5725
Жовтень	31112	8861	1999
Листопад	38114	8952	2010
Грудень	43727	-	1855
Разом	390135	43439	62334

Розрахунок економічної ефективності від запровадження нової схеми сушіння зерна ґрунтується на розробці норм витрати палива, що споживається зерносушаркою.

Розрахунок норм витрати палива провадиться в умовних одиницях, а маса зерна та продуктивність сушарок враховується в умовному обчисленні - планових одиницях (тоннах), т/год. Питома витрата умовного палива на планову одиницю для кожного виду зерносушарок розраховується за формулою [31]:

$$E_y = \frac{E_H}{M_{пл}} \cdot K_H, \quad (4.1)$$

де E_y – питома витрата умовного палива на планову одиницю, кг/т; E_H – маса натурального палива, витраченого на сушіння, кг; M_{nn} – маса просушеного зерна у плановому обчисленні, т.; K_n – коефіцієнт перерахунку натурального палива в умовне, для газу приймається $K_n = 1,171$.

Норма витрати палива для конкретного виду зерносушарки на рівні підприємства може бути визначена за такою формулою:

$$H_{cp} = \frac{\sum H_{yi}}{K_i}, \quad (4.2)$$

де H_{cp} – норма витрати палива на сушіння зерна середньозважена, кг/т; H_{yi} – норма витрати палива на i -ий тип зерносушарок, кг/т; K_i – кількість видів зерносушарок.

Розрахунок групової норми (H_{gp}) проводиться за такою формулою [31]:

$$H_{gp} = \frac{\sum K_i \cdot H_i}{\sum K_i}, \quad (4.3)$$

де H_{gp} – групова норма витрати умовного палива на сушіння планової тонни зерна, кг; K_i – кількість сушарок i -го типу в даному періоді; H_i – норм витрати умовного палива на планову одиницю сушіння на i -ом типі зерносушарок.

В основу розробки прогресивних норм витрати палива покладено метод кореляційно-регресивного аналізу з урахуванням факторів, що впливають на питому витрату палива: температури атмосферного повітря та температури зерна до сушіння. На основі отриманих даних встановлена наступна залежність у вигляді рівняння регресії:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2, \quad (4.4)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти регресії; x_1 – температура атмосферного повітря, °C; x_2 – температура зерна до сушіння, °C.

На підставі вищенаведеної методики нормування палива на сушіння зерна розраховуються норми витрати умовного палива на сушіння зерна в традиційній, що використовується на підприємствах, та проектової зерносушарках, що модернізується (табл. 4.3, табл. 4.4).

Таблиця 4.3 – Норми витрати умовного палива на сушіння зерна у стаціонарних зерносушарках традиційного типу

Температура повітря, °С	Норма витрати пального (кг умовного палива на одну планову тонну) при температурі зерна, °С										
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
-6	14,0	13,8	13,5	13,3	13,1	13,0	12,9	12,7	12,5	12,2	11,8
-4	13,8	13,6	13,4	13,1	13,0	12,9	12,8	12,7	12,5	12,1	11,7
-2	13,6	13,4	13,2	13,0	12,8	12,7	12,5	12,3	12,2	12,0	11,6
0	13,4	13,1	13,1	12,9	12,8	12,7	12,5	12,3	12,1	12,0	11,4
2	13,2	13,0	12,9	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1	12,0	11,9	11,3
4	13,0	12,9	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,1
6	12,9	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1	12,0	11,9	П,7	11,6	11,0
8	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,6	11,4	10,9
10	12,6	12,5	12,2	12,1	12,0	11,9	11,7	11,6	П,4	11,2	10,9
12	12,5	12,2	12,1	12,0	11,9	11,7	11,6	11,4	11,2	10,9	10,8
14	12,2	12,1	12,0	11,9	11,7	11,5	11,4	11,2	10,9	10,8	10,7
16	12,1	11,9	11,9	11,7	11,5	11,4	11,2	10,9	10,8	10,7	10,6
18	11,9	11,8	11,7	11,5	11,4	11,2	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5
20	11,8	11,7	11,5	11,4	П,2	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4
22	11,7	11,5	11,4	11,1	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4	10,3
24	11,5	11,4	11,1	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4	10,3	10,2
26	11,4	11,1	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5	10,4	10,3	10,2	10,1

Таблиця 4.4 – Норма витрати умовного палива на сушіння зерна в стаціонарній зерносушарці, що проектується

Температура повітря, °С	Норма витрати пального (кг умовного палива на одну планову тонну) при температурі зерна, °С										
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
-6	9,5	9,3	9,2	9,0	8,9	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	8,2
-4	9,3	9Д	8,9	8,8	8,7	8,5	8,4	8,3	8,1	7,9	7,8
-2	9,1	8,9	8,8	8,5	8,4	8,3	8,1	7,8	7,8	7,6	7,6
0	8,9	8,7	8,7	8,5	8,4	8,3	8,1	7,9	7,7	7,6	7,5
2	8,8	8,6	8,5	8,4	8,2	8,1	7,9	7,7	7,6	7,5	7,3
4	8,6	8,5	8,4	8,2	8,1	7,9	7,7	7,6	7,5	7,3	7,2
6	8,5	8,4	8,2	8,1	7,9	7,7	7,6	7,5	7,3	7,2	7,1
8	8,4	8,2	8,1	7,9	7,7	7,6	7,4	7,3	7,2	7,0	6,8
10	8,2	8,1	7,8	7,7	7,6	7,4	7,3	7,2	7,0	6,8	6,7
12	8,1	7,8	7,7	7,6	7,4	7,3	7,2	7,0	6,8	6,6	6,5
14	7,8	7,7	7,6	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,5	6,4
16	7,7	7,5	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,5	6,4	6,3
18	7,5	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,5	6,4	6,3	6,2
20	7,4	7,3	7,1	7,0	6,8	6,6	6,5	6,4	6,3	6,2	6,2
22	7,3	7,1	7,0	6,7	6,6	6,5	6,3	6,2	6,2	6,1	6,1
24	7,1	7,0	6,7	6,6	6,5	6,5	6,2	6,2	6,1	6,1	6,1
26	7,0	6,7	6,6	6,5	6,3	6,2	6,2	6,1	6,1	6,1	6,0

Після того, як зроблено розрахунки норм витрати умовного палива, приступаємо до економічного розрахунку вартості палива на сушіння зерна. Як норму витрати умовного палива для традиційно використовуваного на підприємстві методу прийmemo 12,2 кг/т (середньоарифметична), для проектного варіанта за умови зниження питомої норми витрати - 8,54 кг/т. Порівняльні розрахунки вартості палива на проведення операції з сушіння зерна наведено у таблиці 4.5.

Потреба в натуральному паливі (рядок 5) обчислюється шляхом поділу потреби в умовному паливі (рядок 3) на коефіцієнт перекладу (рядок 4).

Як видно з розрахованих даних, потреба в натуральному паливі проектованої установки значно менше традиційно-використовується (відхилення склало 135770,1 м). Відповідно економія складає 168,5 тис. на рік. Природно, дані значення безпосередньо залежать від обсягу сушіння зернових культур на елеваторі. Також слід наголосити, що розрахована економія від операції сушіння має сезонний характер, оскільки основний обсяг припадає на період збирання зерна у сільгосппідприємствах. При цьому в розрахунках не враховано решту витрат на проведення сушіння зерна (заробітна плата технологічних робітників, амортизаційні відрахування, накладні витрати), оскільки проведення модернізації їх не зачіпає.

Таблиця 4.5 – Розрахунок вартості палива на сушіння зерна

Показники	Традиційний метод	Проектована установка	Відхилення, +/-
1. Об'єм зерна, що підлягає сушінню, т	43439	43439	-
2. Норма витрати умовного палива, кг/т	12,2	8,54	-3,66
3. Потреба умовного палива на сушіння, кг	529955,8	370969,1	-158986,7
4. Коефіцієнт переведення умовного палива в натуральне (газ)	1,171	1,171	-
5. Потреба натурального палива, м	452566,9	316796,8	-135770,1
6. Вартість палива, грн./1000м ³	1241	1241	-
7. Вартість палива, необхідного	5616	3931	-168,5

для сушіння зерна, тис. грн			
-----------------------------	--	--	--

Сушіння та активне вентилявання в даному процесі інноваційних технологій розглядаються разом, оскільки є операції, що взаємно доповнюються. На темпи сушіння крім якості зерна впливає виробництва зерносушильного обладнання, наявність необхідної місткості бункерів для зберігання зерна до і після сушіння, сумарна продуктивність установок для активного вентилявання зерна.

Критеріями оптимізації сушіння та активного вентилявання зерна є: експлуатаційна продуктивність зерносушарок, якість зерна, час сушіння, місткість оперативних бункерів (до і після зерносушарки), величина місткості складів, обладнаних установками активного вентилявання, кількість просушених партій, капітальні та поточні.

Таблиця 4.6 – Розрахунок вартості палива для проведення активного вентилявання зерна

Показники	Традиційний метод	Проектована установка	Відхилення, +/-
1. Об'єм активно-вентильованого зерна, т	390135	390135	-
2. Норматив проведення робіт з активного вентилявання, раз на тиждень	1	0,67	-0,33
3. Норматив проведення робіт з активного вентилявання, щорічно	52	35	-17
4. Обсяг робіт із зерном, що підлягає активному вентиляванню, т	20287020	13654725	-6632295
5. Норма витрати електроенергії на 1 планову тонну загального комплексного вантажообігу, кВт-год.	2,13	2,34	+0,21
6. Коефіцієнт перерахунку до загального комплексного вантажообігу	0,2	0,2	-
7. Потреба в електроенергії для проведення робіт з активного вентилявання, кВт-год.	8642270,5	6390411,3	-2251859,2
8. Вартість 1 кВт-год електроенергії, р.	1,68	1,68	-
9. Вартість спожитої електроенергії, тис. нар.	75188	55597	-19591

Розрахунок вартості палива для проведення операцій активного вентилявання зерна представлений у табл. 4.6. При цьому враховуючи підвищення якості проведення операцій, можливість впровадження датчиків автоматичного контролю та більш тривалий період збереження температурних режимів, трудомісткість проведення операцій активного вентилявання скорочується, а графік проведення даного виду робіт змінюється з одного разу на тиждень до двох разів на три тижні.

Обсяг активно-вентильованого зерна у натуральному вираженні перебуває з урахуванням середньомісячної кількості зернових культур, що надходять протягом року. Норми витрати електроенергії на 1 планову тонну загального комплексного вантажообігу та коефіцієнт перерахунку представлені у таблицях 4.7 та 4.8 відповідно [32].

Розрахунки показують, що в ході проведення модернізації обладнання, впровадження автоматизованих процесів та інноваційних технологій спостерігається зниження обсягу проведених у році робіт з активного вентилявання, що призводить до зниження вартості робіт і позитивного економічного ефекту в сумі 19591 тис. грн.

Наступним етапом розрахунку економічної ефективності проектування зерносушарки є розрахунок економії від зниження природних втрат зерна.

У зерновиробничих господарствах практично відсутні зерно- і насіння сховища з комплексною механізацією технологічного процесу.

Таблиця 4.7 – Питомі норми витрати електроенергії за окремими операціями із зерном, кВт-год.

Прийом зерна з автотранспорту (без ворохоочисника)	0,91
Прийом зерна із залізниці	0,88
Сушіння зерна	3,69
Очищення зерна на сепараторах у потоці прийому:	
а) подання зерна	0,28
б) очищення зерна	0,80
в) прибирання після очищення	0,37
Очищення зерна в потоці прийому:	
а) подання зерна	0,39
б) очищення зерна на сепараторах	0,80
в) очищення зерна на трієрах	0,94
г) збирання зерна після очищення	0,37

Активне вентилявання	2,13
Відвантаження на залізничний транспорт	0,71

Найчастіше зерно, зокрема і товарне, зберігається у необладнаних і непристосованих приміщеннях, що веде до його значних втрат. Про розміри втрат можна судити за нормативами природних втрат, які залежать від способу зберігання та виду ємностей. Так, якщо при зберіганні в елеваторах вони становлять, наприклад, для зерна пшениці, жита та ячменю 0,05 %, то при зберіганні у складах – 0,07 %, а на непристосованих майданчиках – вже 0,12 %. При зберіганні зерна від 3 до 6 місяців норма природних втрат зростає приблизно на 40 %, а від 6 місяців до року - ще на 40 %. Втрати у непристосованих приміщеннях у самих сільських товаровиробників виявляються набагато вищими.

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти перерахунку до планових тонн комплексного та загального комплексного вантажообігу

Операції	Коефіцієнт перерахунку
Складське приймання зерна та продуктів його переробки	0,5
Складська відпустка зерна та продуктів його переробки	0,5
Транзитно-розрахункові операції	0,05
Зберігання сортового насіння зернових та олійних культур, трав'яного борошна	0,5
Зберігання інших хлібопродуктів	0,2
Комплексний вантажообіг	1,0
Очищення на сепараторах	0,6
Активне вентилявання	0,2
Підробіток (загалом) зерна	0,3
Сушіння зерна	0,75

Додатково до втрат від неправильного зберігання товаровиробники зазнають втрат від недоотримання виручки від реалізації зерна, що не відповідає вимогам стандартів, від збільшення транспортних витрат на перевезення вологого та засміченого зерна. Результати розрахунків економії від зниження природних втрат зерна зведені в табл. 4.9.

Як видно з проведених розрахунків, проектований варіант внаслідок підвищення якості зберігання дозволяє значно знизити природне зменшення зерна і підвищити ефективність послуг. Впровадження нової установки дозволить елеватору заощаджувати 7198 тис. грн. на рік за рахунок впровадження заходу, що проектується.

Так як проектована зерносушарка передбачає встановлення додаткового вентиляційного обладнання, на привід якого витрачається електроенергія, то сумарна потреба в електроенергії зросте на 20%, що необхідно врахувати в економічному обґрунтуванні проекту (таблиця 4.10) (Додаткового обладнання відповідно викличе збільшення норми споживаної енергії (на у випадку воно склало 0,69 кВт-год.) Вартість споживаної вентиляторами електроенергії в проектованому варіанті порівняно з традиційною установкою буде вищою на 26 тис. р. на рік.

Таблиця 4.9 – Розрахунок економії від зниження природних втрат зерна

Показники	Традиційний метод	Проектована установка	Відхилення, +/-
1. Зберігання зерна, т у тому числі: до 3-х місяців від 3-х до 6-ти місяців понад 6 місяців	35520 8120 13000 11400	32520 8120 13000 1400	-
2. Норми природного зменшення зерна, що знаходиться на зберіганні, %: до 3-х місяців від 3-х до 6-ти місяців понад 6-ти місяців	0,05 0,07 0,1	0,02 0,02 0,02	-0,03 -0,05 -0,08
3. Втрати зерна при зберіганні, т до 3-х місяців від 3-х до 6-ти місяців понад 6 місяців	24,56 4,06 9,10 11,40	6,50 1,62 2,60 2,28	-18,06 -2,44 -6,50 -9,12
4. Відпускна ціна 1 т зерна, тис. грн.	7500	6500	+0,04
5. Вартість втрат зерна, тис. грн.	9824	2626	-7198

Дане збільшення витрат у порівнянні з вище прорахованою економічною вигодою вважатимемо незначним. Оцінка конкурентоспроможності будь-якого товару (послуги) провадиться на основі зіставлення продукції даного підприємства з відповідною продукцією інших фірм.

Показник конкурентоспроможності продукції виражається ставленням корисного ефекту до ціни споживання, а за корисний ефект приймаються інтегральні показники характеристик товару – його якості.

Характеристика якості прямо пропорційна показникам конкурентоспроможності. Великий вплив на прийняття рішення щодо вибору постачальника надає саме якість товару (послуги). Ціна товару нерозривно пов'язана з його якістю та прямо пропорційна йому. Інтереси споживача до якості та ціни продукції (послуги) протилежні.

У процесі впорядкування ринкових відносин і становлення цивілізованого ринку хлібопродуктів чималу роль відіграє якість зерна і продуктів його переробки, з обігу яких повинні бути виключені неякісні, нестандартні або небезпечні для здоров'я та життя населення продукти. Державне регулювання виявляється у встановленні контролю над діяльністю учасників ринку хлібопродуктів та якістю їхньої продукції.

Таблиця 4.10 – Розрахунок витрат на електроенергію від запровадження ТНУ

Показники	Традиційний метод	Проектована установка	Відхилення, +/-
1. Об'єм зерна, що підлягає сушінню, т	43439	43439	-
2. Норма електроенергії, що споживається вентиляторами та компресором ТНУ, кВт·год/т	3,46	4,15	+0,69
3. Потреба в електроенергії на сушіння, кВт-год	150298,9	180271,9	+29973
4. Вартість 1 кВт-год електроенергії, р.	168	168	-
5. Вартість споживаної вентиляторами електроенергії, тис. грн.	1308	1568	+260

Обстеження якості на першому етапі (у зерновиробників) ведеться з поділом за класами, тобто під час обстеження пшениці визначаються тільки ті показники, які є домінуючими: вміст та якість клейковини, «число падіння», вміст пророслих зерен. Інші показники якості: склоподібність, натура, вологість, засміченість та інші, які в процесі післязбиральної обробки на елеваторах можна поліпшити часто не беруть до уваги, хоча вони також

надають визначальне значення на якість кінцевого продукту - хлібобулочних виробів.

Проектована модернізація передбачає внаслідок поліпшення режимів сушіння та зберігання зерна поліпшення його якісних характеристик, що позитивно позначиться обсягом і вартості робіт безпосередньо в промислових підприємств-переробників зернової сировини. Поліпшення якісних характеристик можна прямо пов'язати із ціною зерно. Задамося збільшенням відпускної ціни зерно пшениці на 1 %. Це збільшення ціни спричинить зростання валових доходів підприємства, однак діапазон співвідношення ціни та якості зернопродуктів дозволить надати елеватору значний конкурентоспроможний статус. У зернопереробних підприємств скоротяться витрати на підготовку сировини до помелу на технологічних елеваторах.

Розрахунок економічного ефекту від підвищення якості зерна проводиться за такою формулою:

$$E_{\text{як}} = V_{\text{від}} \cdot C_l \cdot \frac{\Delta C}{100}, \quad (4.5)$$

де $E_{\text{як}}$ – економічна ефективність збільшення якості зерна, тис. грн.; $V_{\text{від}}$ – обсяг відпущеного (реалізованого) зерна, т.; C_l – початкова вартість реалізації зерна, тис. грн.; ΔC – приріст ціни, %.

Відповідно до формули (4.1) економічний ефект від підвищення якості зерна становитиме:

$$E_{\text{як}} = 62334 \cdot 4 \cdot \frac{1}{100} = 24934 \text{ тис. грн.}$$

Підсумковий економічний ефект від впровадження нової зерносушарки розраховується за формулою:

$$E_{\text{заг}} = E_c + E_{\text{ав}} + E_{\text{еу}} + E_{\text{в}} + K_{\text{тл}} \quad (4.6)$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальний економічний ефект, тис. грн.; E_c – економія електроенергії на сушінні, тис. грн.; $E_{\text{ав}}$ – економія електроенергії на активному вентиляванні, тис. грн.; $E_{\text{еу}}$ – економія від зниження втрат від

природних втрат, тис. грн.; E_e – економічний результат від впровадження у технологічний ланцюг додаткового вентилятора, тис. грн.; E_{m_1} – економічний результат підвищення відпускної ціни за рахунок підвищення якості зерна, тис. грн.

Таким чином, згідно з формулою (4.6) економічний ефект проектованої зерносушарки складе:

$$E_{\text{заг}} = 1685 + 19591 + 7196 - 260 + 24934 = 466698 \text{ тис. грн.}$$

Таблиця 4.11 – Розрахунок економічного ефекту від впровадження модернізованої зерносушарки ДСП-16 та інноваційних технологій активного вентилявання

Показники	Традиційний метод	Проектована установка	Відхилення, +/-
1 Вартість палива, необхідного для сушіння зерна, тис. грн.	5616	3931	-1685
2 Вартість спожитої електроенергії для активного вентилявання, тис. грн.	75188	55597	-19591
3 Вартість втрат зерна від природних втрат, тис. грн.	9824	2626	-7196
4 Вартість споживаної вентиляторів електроенергії, тис. грн.	1308	1568	+260
5 Економічний ефект від збільшення відпускної ціни зерна, тис. грн.	249336	2518294	+24934

Термін окупності проекту щодо впровадження заходів, що проектуються, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{KB}{E_{\text{заг}}}, \text{ тис. грн.} \quad (4.7)$$

де KB – капітальні вкладення (250000 тис. грн.).

Термін окупності проекту щодо впровадження заходів, що проектуються, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{250000}{466698} = 0,54 \text{ роки.}$$

Рентабельність капітальних вкладень є відношенням сумарного прибутку (у нашому випадку $E_{\text{заг}}$), що приноситься інвестиціями, до

величини інвестицій (капітальні вкладення KB). Рентабельність капіталовкладень є зворотною величиною терміну окупності:

$$P_{KB} = \frac{466698}{250000} = 1,87 \text{ роки.}$$

Таким чином, пропоновані технічні та технологічні рішення є економічно доцільними, вкладений у проект карбованець інвестицій дозволить одержати прибуток у сумі 1,87 роки та окупити капітальні вкладення за 0,54 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вирішено математичну модель процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці, що враховує зв'язок температури і вологого вмісту дисперсного матеріалу, що рухається безперервним потоком. Модель дозволяє визначати поля температур і вмісту вологи зернового шару. Застосування моделі у завданнях управління процесом сушіння забезпечить оперативну стабілізацію термовлажностных характеристик зерна у сфері допустимих технологічних властивостей.

2. Експериментально-статистичними методами дослідження отримано регресійні рівняння, що адекватно описують процес конденсації вологи з вологого повітря на охолодній поверхні випарника теплонасосної установки. Щодо шахтних зерносушарок отримано інформацію про вплив факторів та визначено раціональні технологічні режими кондиціювання відпрацьованого повітря при його підготовці до сушіння та активного вентилявання зерна.

3. Методами математичного моделювання дисперсних систем як об'єктів з розподіленими параметрами розроблено математичну модель процесу самозігрівання зернової сировини у силосі. Вирішено зворотне завдання теплопровідності, що дозволяє за інформаційними сигналами про поточну температуру зернового шару за умов постійно діючих перешкод здійснювати оперативне попередження локальних вогнищ самозігрівання при зберіганні зерна.

4. Запропоновано оригінальну конструкцію зерносховища та розроблено інженерну методику силосних зерносховищ.

5. Розроблено спосіб стабілізації термовологісних характеристик зерна при його сушінні в шахтних зерносушарках та тривалому зберіганні в зерносховищах силосного типу з використанням теплонасосної установки.

6. Складено програмно-логічний алгоритм управління процесами сушіння та зберігання зерна, що дозволяє знизити питомі енерговитрати на 10...15%.

7. Проведено виробничі випробування способу на Воронежському експериментальному комбикормовому заводі, які підтвердили його високу ефективність. Очікуваний річний економічний ефект від використання запропонованих технічних рішень становив 24934 тис. грн, окупити капітальні вкладення за 0,54 роки.