

**ПОЛТАВСЬКА ДЕРЖАВНА АГРАРНА АКАДЕМІЯ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра технологій та обладнання переробних і харчових виробництв**

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

на тему: «Підвищення ефективності зернової сушарки контактного типу»

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 \_\_\_\_  
ШАДЯН А. В.  
*Прізвище та ініціали студента*  
Керівник: САКАЛО В. М.  
*Прізвище та ініціали керівника*  
Рецензент: ІВАНКОВА О. В.  
*Прізвище та ініціали рецензента*

**Полтава – 2021 року**

## ВСТУП

**Актуальність.** Єдиним способом збереження зерна від усіх негативних факторів є сушіння, яке не тільки призупиняє подальше його розкладання, а й повністю запобігає всім негативним наслідкам, які знижують насіннєві та продовольчі якості зерна.

Численними дослідженнями доведено, що вологе зерно після сушіння не тільки зберігає ті властивості, якими воно мало до проведення зазначеної операції, а й набуває цілого ряду позитивних якостей. Так, наприклад, схожість, енергія проростання, хлібопекарські якості та смак випеченого хліба будуть значно кращими у висушеному зерні, ніж вони були в тому ж зерна до проведення операції сушіння.

В даний час застосовують різні способи видалення надлишкової вологи із зерна. Одним з найбільш використовуваних способів є конвективний. Його сутність полягає в тому, що вологому зерну передається теплота за допомогою нагрітого повітря, останній нагрівають матеріалами топками або природним газом. Але, не дивлячись на те, що цей спосіб широко поширений, він є найбільш енерговитратним через дорожнечу палива, що використовується. Ще одним його недоліком є нерівномірність обробки, яка в результаті може стати причиною псування продукту. Відповідно, використовуваний у роботі цей спосіб сушіння і найпоширеніші країни установки мають аналогічні недоліки.

Таким чином, одним з найважливіших та актуальних науково-технічних завдань є розробка енерго- та ресурсозберігаючих технічних засобів для сушіння зерна, що забезпечують при цьому необхідну якість оброблюваного матеріалу на виході за встановленої пропускної спроможності.

**Мета дослідження** – зниження енерговитрат на сушіння зерна за допомогою обґрунтування нової конструкції зерносушарки, яка використовує контактний спосіб підведення теплоти до вихідного продукту.

У відповідності до мети в роботі вирішувались наступні завдання:

– проаналізувати відомі технології та пристрої для сушіння зерна, визначити подальший напрямок їх розвитку;

- розробити конструкцію зерносушильної установки з контактним підведенням теплоти до продукту, що висушується, теоретично обґрунтувати її основні конструкційно-технологічні параметри;
- виявити конструктивні параметри та режими роботи сушарки, які забезпечують мінімальні витрати енергії на процес сушіння;
- надати оцінку рівня потенціального небезпеки для природного навколишнього середовища та провести аналіз потенціальним можливостям виникнення аварійнонебезпечним ситуаціям при використанні нового технологічного засобу;
- оцінити економічну ефективність використання розробленої сушарки при зневодненні сипких матеріалів.

**Об’єкт дослідження** – технологічний процес сушіння зерна в зерносушильній установці контактного типу.

**Предмет дослідження** – закономірності технологічного процесу сушіння зерна.

**Методика досліджень.** Постановку експериментальних досліджень проводили відповідно до чинних стандартів і розроблених індивідуальних методик.

Обробка результатів досліджень проводилася за допомогою ПК та використанням програмних продуктів: Microsoft Excel, математичного редактора STATISTICS.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у складеній математичній моделі у формі регресійного рівняння, що відображає зв’язок між факторами впливу – швидкість переміщення зерна та температура гріючої поверхні – на визначальний чинник роботи зерносушарки – питомі енерговитрати.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає у обґрунтовані в результаті проведених досліджень конструктивні параметри та режими роботи запропонованого засобу механізації сушіння зерна дозволяють домогтися зниження питомих енерговитрат на випаровування вологи на 48,1% порівняно з лотковою сушаркою, що випускається серійно.

# 1 СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Аналіз застосовуваних способів сушіння зерна та їх ефективність у циклі його післязбиральної обробки

Щороку в нашій країні виробляють велику кількість зерна, яке потрібно зберегти без втрат. Як було помічено раніше, правильніше зберігати зерно сухим. Внаслідок цього, перш за все, необхідно зменшити його вологість до кондиційного значення.

Для забезпечення довготривалої безпеки зерно і насіння за вмістом води потрібно довести до наступних нормативів: пшениця, жито, ячмінь, овес, рис, гречка, горох – 14 %, просо – 13,5 %, кукурудза – 13 %, соя – 12%, соняшник середньоолійний – 11%, високоолійний – 7%, квасоля – 16% [2].

Тому головним завданням сушіння зерна є одержання продукту з оптимальними властивостями. Саме від цього залежить вибір способу сушіння, типу сушильної установки та режимів її роботи [6,8]. Тривалість та якість сушіння зерна на зерносушарках залежить від способів сушіння, які у свою чергу знаходяться у прямій залежності від системи зерно-сушарок [9].

Існує три основні режими сушіння: м'який, нормальний та високотемпературний. Перші два режими вважаються низькотемпературними — у них використовують теплоносія з температурою не більше 100 °С, а при високотемпературному режимі зерно піддають обробці понад 100 °С.

Тому варто враховувати, що чим вища вологість зерна, тим м'якіший режим сушіння слід застосовувати. Для досягнення потрібного значення вологості застосовують способи сушіння зерна, що мають на сьогоднішній день широке різноманіття (рис. 1.1) [17].

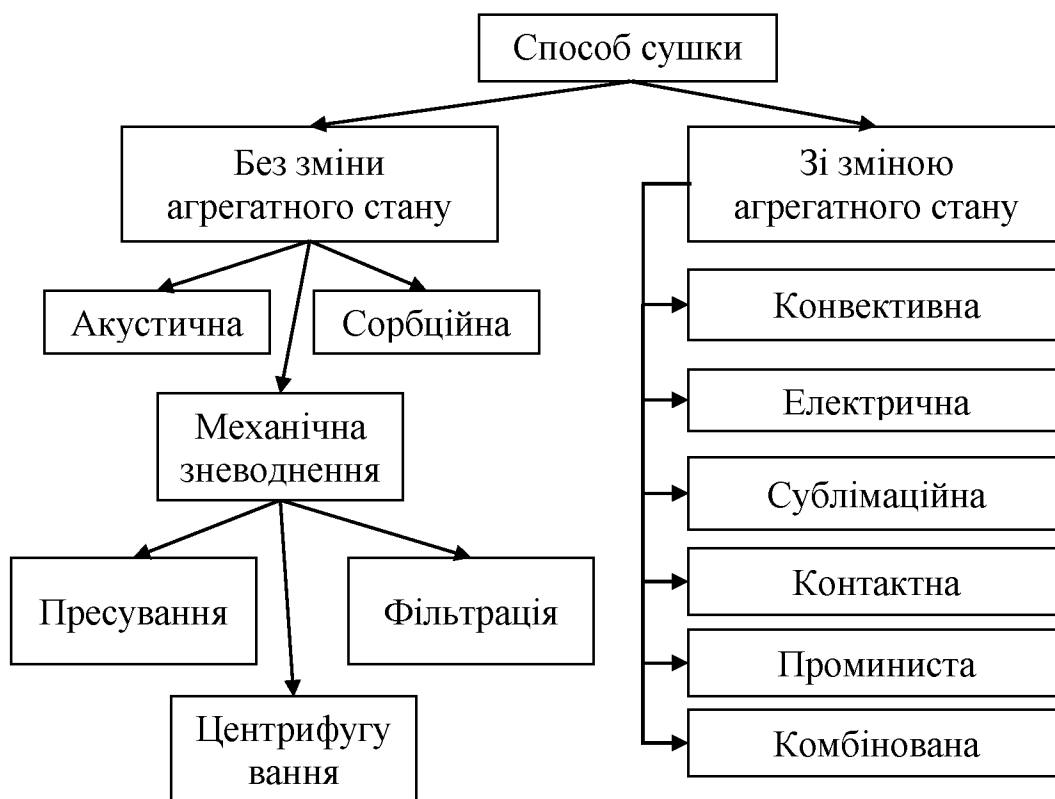


Рисунок 1.1 – Класифікація способів сушіння

Вони зводяться до таких основоположних принципів:

- відокремлення вологи від зерна без зміни її агрегатного стану, тобто у вигляді рідини;
- відокремлення вологи від зерна зі зміною її агрегатного стану, тобто. шляхом перетворення її на пар [18,23].

**Сорбційний спосіб** (рис. 1.2) являє собою змішування зерна, що містить надмірну вологу, з будь-яким поглиначем, функцією якого є збір виділеної із зерна вологи. Після деякого часу сорбент відокремлюють від зерна, сушать та повторно застосовують. Найчастіше даний спосіб використовують при видаленні надмірної вологи з насіння гороху або бобів, так як їх термостійкість досить невисока. До хімічних сорбентів можна віднести хлорид кальцію або силікагель (рис. 1.2 б, в). Однак не з усіма речовинами можна змішувати зерно і не від усіляких речовин його можна легко відокремити.



а)

б)



в)

а - тирса; б – силікагель; в – хлористий кальцій

Рисунок 1.2 – Сорбенти.

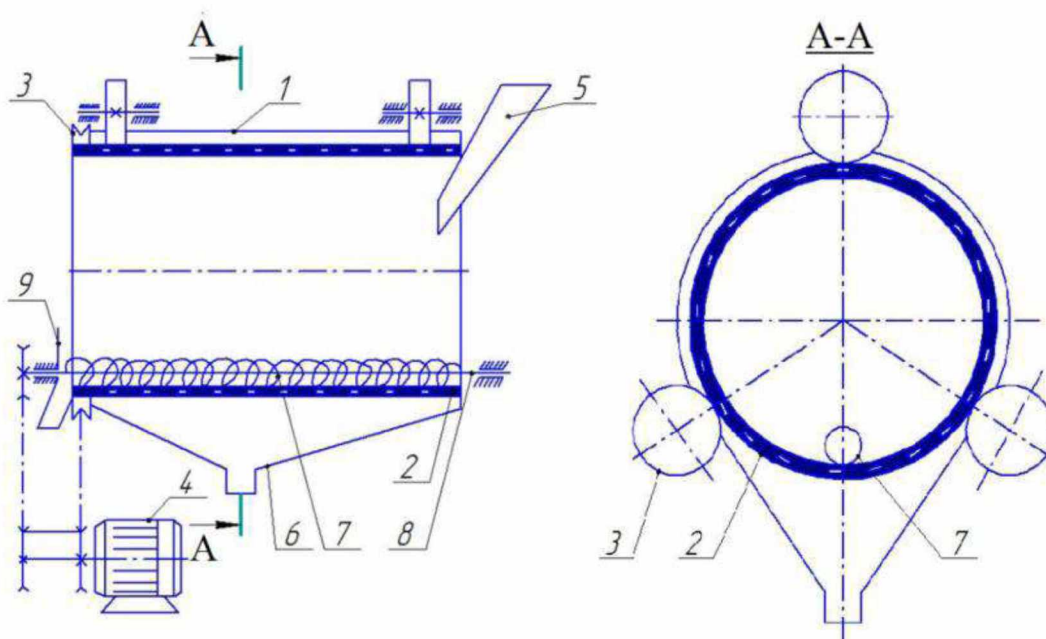
Найбільш підходящим і доступним матеріалом є тирса деревини (рис. 1.2 а). Для зниження вологості однієї тонни зерна на 1% потрібно 70 кг тирси. Крім того, тирсу можна використовувати багаторазово. Для цього необхідно зволожену від поглинання води тирсу просушити і знову пустити в справу.

Даний спосіб не пов'язаний з витратами палива або електрики на сушіння матеріалу, але вимагає 1...2 тижні часу, що є тривалим терміном у порівнянні з існуючими способами, а також вимагає додаткових приміщень. Крім того, для повторного застосування сорбентів їх потрібно сушити, що іноді потребує додаткової витрати енергії.

**Механічний спосіб** (пресування, фільтрація, центрифугування) зневоднення застосовують за наявності вільної вологи (неміцний зв'язок вологи з тканинами зерна). При даному способі вільної вологи позбавляються методом механічного

впливу на зерно внаслідок впливу на вологу сили тяжіння або спільного впливу сили тяжіння і відцентрової сили.

Як приклад застосування зазначеного вище способу можна навести пристрій для видалення зовнішньої вологи із зерна (рис. 1.3). Принцип його роботи полягає у наступному. Подається зерно в ротор і під дією відцентрової сили притискається до стінок. Ротор виконаний перфорованим для видалення вологи. Також усередині ротора розташована спіраль, яка рівномірно розподіляє зерно по стінках ротора та переміщає висушене зерно до збірки [20].



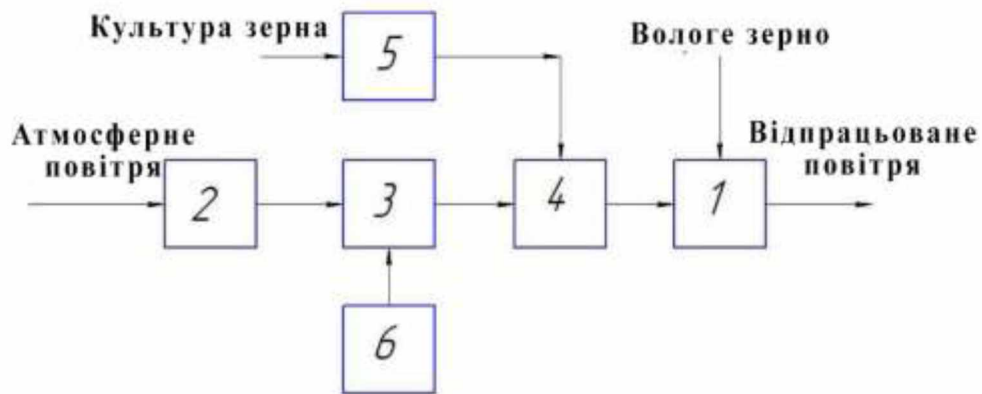
1 – корпус; 2 - ротор; 3 - ролики; 4 - привід; 5 - жолоб для завантаження вологого зерна; 6 - збірник осаду; 7 - спіраль; 8 - стрижень; 9 - збірка сухого зерна.

Рисунок 1.3 – Пристрій для видалення зовнішньої вологи із зерна.

Цей спосіб найдешевший, але застосовується тільки за наявності вільної вологи.

**Конвективний метод.** Теплота, необхідна для нагрівання вологого зерна, передається йому конвекцією від газоподібного теплоносія, що рухається (нагрітого повітря або його суміші з продуктами горіння), званого агентом сушіння. Взаємодіючи із зерновою масою, агент сушіння забезпечує тепло- та масообмін: зерно нагрівається, волога випаровується, поглинається газами та виноситься в навколишнє середовище [23,25].

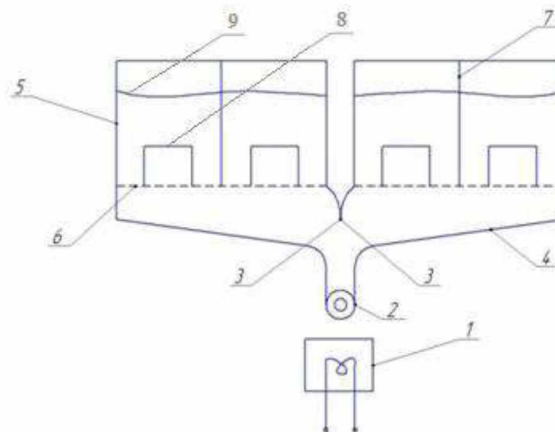
Існують різні способи інтенсифікації конвективної сушіння. Наприклад, спосіб сушіння зерна, згідно з патентом № 2502027, полягає у проходженні крізь зерновий шар атмосферного або підігрітого повітря, збагаченого аероіонами. Збагачення агента сушіння аероіонами здійснюють періодично, при цьому періоди збагачення аероіонами залежать від культури зерна та конструктивних особливостей установки для сушіння зерна та змінюються в межах від 5 до 60 хвилин (рис. 1.4) [24].



1 - сушильне встановлення; 2 – вентилятор; 3 – нагрівальні елементи; 4 – іонізатор;  
5 - програмний пристрій; 6 - система управління температурою повітря

Рисунок 1.4 – Конвективний спосіб сушіння зерна.

Голубкович А.В., Павлов С.А., Ізмайлов А.Ю. розробили спосіб сушіння насіння та зерна (рис. 1.5) [19].



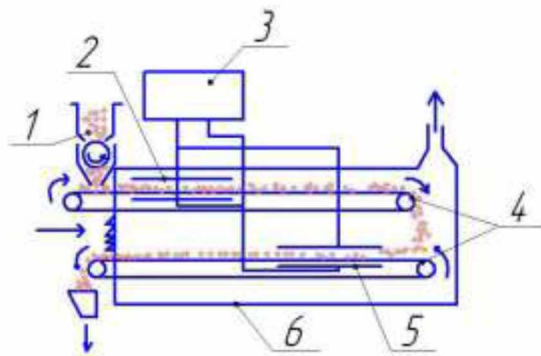
1 – калорифер; 2 – вентилятор; 3 – заслінка; 4 – повітряний канал; 5 - сушильні камери; 6 - ґрати; 7 – перегородка в сушильних камерах; 8 – розвантажувальні вікна;  
9 - насип зерна

Рисунок 1.5 - Конвективний спосіб сушіння.

Зазначений спосіб може зберігати найбільшу дозволена температуру агента сушіння. Питома подача агента сушіння визначається залежно від його температури, початкової та кінцевої вологості матеріалу в інтервалі висоти шару від 0,1 м до 0,7 м. Висоту шару обмежують втратами напору в ньому. При визначенні питомої подачі агента сушіння беруть до уваги коефіцієнт випаровування вологи та питому поверхню зерна.

Конвективний спосіб є найбільш використовуваним серед усіх способів сушіння, але все ж таки він має недоліки, такі як випаровування вологи тільки з поверхні продукту, нераціональне використання енергії установки, а головне - невисокий коефіцієнт теплопередачі від нагрітого повітря зерну.

При **електричному способі** вологий матеріал укладають у полі струмів високої частоти (ТВЧ) між двома пластинами конденсатора (рис/ 1.6) [21,25].



1 – завантажувальний бункер; 2, 5 – пластини конденсаторів; 3 – генератор; 4 – стрічковий транспортер; 6 - корпус

Рисунок 1.6 - Схема сушарки ТВЧ для подрібнених матеріалів.

За рахунок руху стрічкового транспортера продукт переміщається у напрямку вивантаження. Одночасно з переміщенням молекули продукту наводяться в коливальні рухи за рахунок поляризації. Коливання відбуваються одночасно з тертям частинок і нагріванням оброблюваного матеріалу. Поданий спосіб дозволяє за короткий термін і поступово підняти температуру зерна, що призведе до випаровування вологи [28].

Але, попри його переваги, представлений спосіб немає затребуваності у сільськогосподарських підприємствах, що пов'язані з високими витратами енергії, і навіть складності устаткування й обслуговування установок.

**Контактний спосіб** є повідомлення зерну теплоти за допомогою зіткнення його з нагрітою поверхнею. Повітря при застосуванні даного способу виконує функцію вологопоглинача, а саме виведення водяної пари з пристрою. Контактний спосіб є найбільш енергоефективним, проте його головним недоліком є нерівномірна обробка матеріалу, що висушується: шар матеріалу, що має контакт з нагрітою поверхнею, отримує теплоту в надмірній кількості, в той час як шари, віддалені від поверхні, практично не нагріваються, і процес сушіння у ньому немає [8,10].

**Променистий (радіаційний) спосіб** полягає у передачі теплоти до вологого матеріалу променистою енергією.

Такий вид сушіння поділяють на природну (сонячними променями) та штучну (інфрачервоними променями) [15,23].

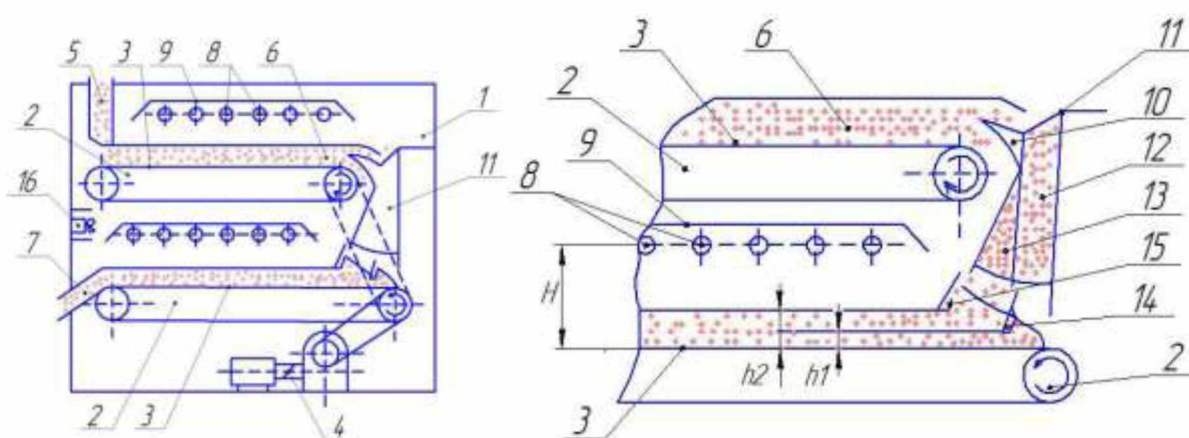
Природне сушіння полягає у розсипанні зерна на струмі тонким шаром (5...20 см) з періодичним перемішуванням. Чим вологіше зерно, тим його шар має бути тоншим. Для прискорення процесу сушіння поверхневий шар зерна краще робити хвилеподібним, що створює найкращі умови для його обтікання повітрям. Швидкість сушіння зерна в такий спосіб залежить від його вологості, а також від відносної вологості та температури повітря. В середньому за одну годину сушіння із зерна видаляється до 1% вологи (за умови, якщо на вулиці суха, сонячна погода). Однак цей спосіб має такі недоліки, як потреба у великих площах і постійному перемішуванні зерна, залежність від погодних умов.

Штучна сушіння полягає в підведенні теплоти оброблюваного матеріалу за допомогою інфрачервоних променів (ІКЛ) [26].

Цей спосіб застосовується у багатьох пристроях. Наведемо приклад деяких із них. Установка для сушіння насипної рослинної сировини (рис. 1.7) є дворівневим стрічковим транспортером з розташованими над ним інфрачервоними випромінювачами у вигляді кварцових ламп з функціональним керамічним покриттям. При пересуванні транспортером вологий матеріал піддається інфрачервоному випромінюванню, завдяки чому втрачає надлишки вологи. Як свідчить розробник, цей пристрій спрямовано малі підприємства [15]. Згідно [15],

запропонована установка забезпечує тривалий термін зберігання продукту, що обробляється, що важливо при проведенні сушіння.

Інфрачервона сушарка (патент UA № 2352880), яка являє собою сушильну камеру, в яку встановлені сітчасті піддони з насипаним в них вологим матеріалом. Задатчиком встановлюється необхідна температура, що відповідає граничному значенню нагріву матеріалу, що висушується, після чого включають ІЧ-випромінювачі, завдяки яким матеріал опромінюється прямими і відбитими від профілю бічних стінок променями, що сприяє його нагріванню до потрібної температури і виділенню з нього надлишкової вологи (рис. 1.7).

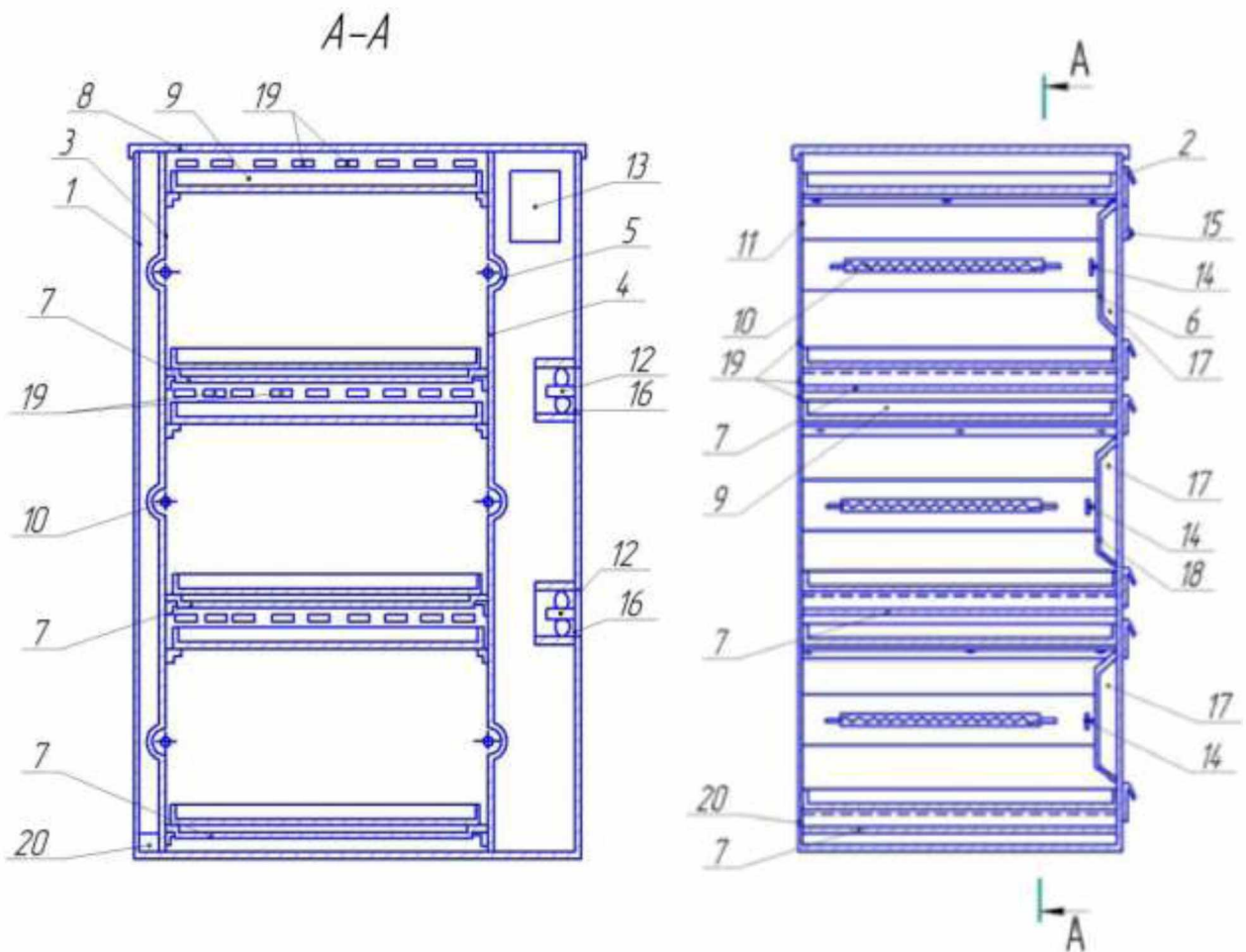


1 – корпус; 2 – транспортер; 3 – стрічка; 4 – привід; 5 – бункер завантаження; 6 - насипний шар; 7 - вивантажувальний лоток; 8 – інфрачервоні випромінювачі; 9 - екрануючі відбивачі; 10 - клиновий дільник; 11 – лоток перевантаження; 12, 13 - струмки насипного шару; 14, 15 - шибєрні заслінки; 16-вентилятор

Рисунок 1.7 - Установка для сушіння насипної сировини.

Як зазначено автором даної установки, при досягненні температури, необхідної для сушіння, інфрачервоні випромінювачі вимикаються за командою датчиків, після чого переходять у режим імпульсного включення у співвідношенні 1/3. Такий підхід до роботи сушарки дозволяє збільшити обсяг оброблюваного продукту втричі без збільшення навантаження на електричну мережу.

Незважаючи на всі плюси застосування зазначеного способу в існуючих сушарках він має такі недоліки, як низький ККД, а також високі витрати енергії, що робить використання даного способу недоцільним.



1 – корпус; 2 – прямокутні отвори; 3, 4 – бічні стінки сушильної камери; 5 – профіль; 6 – передні стінки; 7 - піддони збору просипів; 8 – кришка; 9 - сітчасті піддони; 10 - ІЧ-випромінювачі; 11 – задня стінка; 12 – вентилятор; 13 - блок управління автоматичним регулюванням процесу сушіння; 14 – датчики температури; 15 - датчик установки граничної температури нагрівання; 16 - круглі отвори; 17 - пази; 18 – перфорація; 19 - отвори; 20 - нижня щілина.

Рисунок 1.14 - Сушарка інфрачервона.

Враховуючи всі плюси і мінуси перерахованих вище способів сушіння зерна, можна зробити висновок: пристрій для сушіння зерна повинен підтримувати оптимальні режимні параметри цього процесу, тобто варто зауважити, що існуючі пристрої для сушіння зерна, принцип яких заснований на конвективному способі, споживають 10 кВт/год і більше електроенергії. Звідси випливає, що конструкція зерносушарки має забезпечувати регулювання зазначених характеристик процесу з метою скорочення споживання електрики.

Також зерносушарки мають бути універсальними (сушити зерно різних культур) та без будь-яких шкідливих викидів, що регламентується вимогами щодо захисту навколишнього середовища.

## **1.2 Аналіз конструкцій та класифікація контактних зерносушарок**

В даний час вітчизняні та зарубіжні аграрні господарства експлуатують велику різноманітність конструкцій зерносушарок, внаслідок чого з'являється необхідність створити таку класифікацію, яка дозволить охопити весь існуючий спектр зерносушильних пристроїв для структурування їх конструктивно-технологічних схем і виявлення найбільш вигідних шляхів їх подальшого технічного розвитку. .

Однак, різноманітність існуючих пристроїв не дозволяє скласти класифікацію, яка об'єднає всі пристрої. Розглянувши широкий спектр пристроїв для сушіння зерна за їх конкретними параметрами, нами було вироблено класифікацію зерносушарок з контактним способом підведення теплоти[7,25].

Ця класифікація включає п'ять основних груп установок: з інтенсифікації процесу сушіння; за формою поверхні, що гріє; на вигляд нагрівального елемента; за видом транспортуючого робочого органу; за кількістю робочих секцій.

У свою чергу, за інтенсифікацією процесу сушіння зерна контактні зерносушарки можна підрозділити за 5 основними критеріями:

1) зворушення - це перемішування матеріалу, що висушується для рівномірності його обробки, що дозволяє отримати якісно просушене зерно;

2) комбінований спосіб теплопідведення - видалення вологи із зерна за допомогою підведення до нього теплого повітря та нагрітої поверхні одним прийомом. Такий спосіб дозволяє досягти необхідної вологості при невеликих витратах часу;

3) чергування процесу сушіння і охолодження зерна полягає в тому, що спочатку матеріал, що висушується, піддають тепловому впливу, а після нагрівання зерно охолоджують;

4) зміна кута нахилу гріючої поверхні з метою забезпечення оборотності зерна, що в свою чергу підвищить якість продукту після закінчення сушіння;

5) застосування віброприводу робочого органу призначене для повідомлення робочого органу механічних коливань, амплітуда яких близька до положення рівноваги;

б) повідомлення зворотно-поступальних рухів робочому органу для приведення його в коливання, що сприяє рівномірному сушінню зерна за рахунок постійного перемішування.

За формою гріючої поверхні пристрою для сушіння зерна поділяють на циліндричні (рис. 1.8 а), плоскі (рис. 1.8 б), ступінчасті (рис. 1.8 в) і хвильові (рис. 1.8 г) [23].

Ступінчасті і хвильові поверхні у свою чергу здатні забезпечити не тільки передачу теплоти оброблюваному матеріалу, але і його переміщення.

Нагрівальні елементи - нагрівальні пристрої різних видів і конструкцій, які здатні зумовити вироблення теплової енергії, що застосовується при вирішенні інженерних завдань.

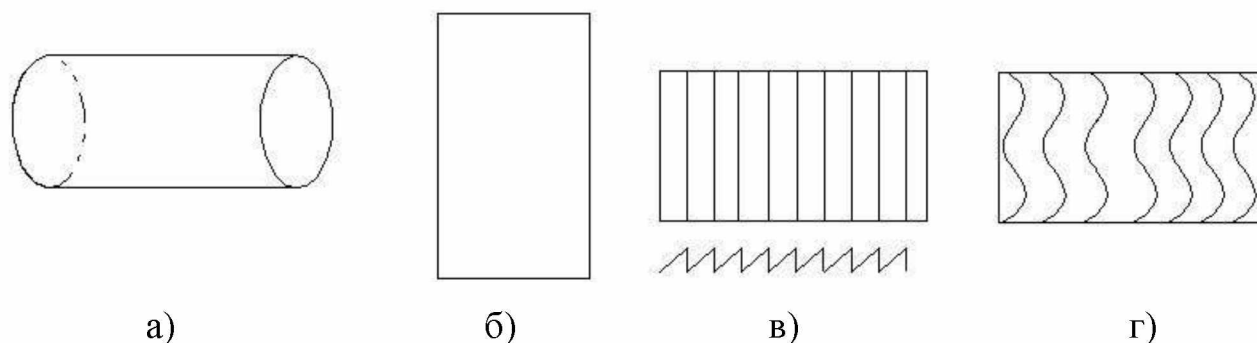
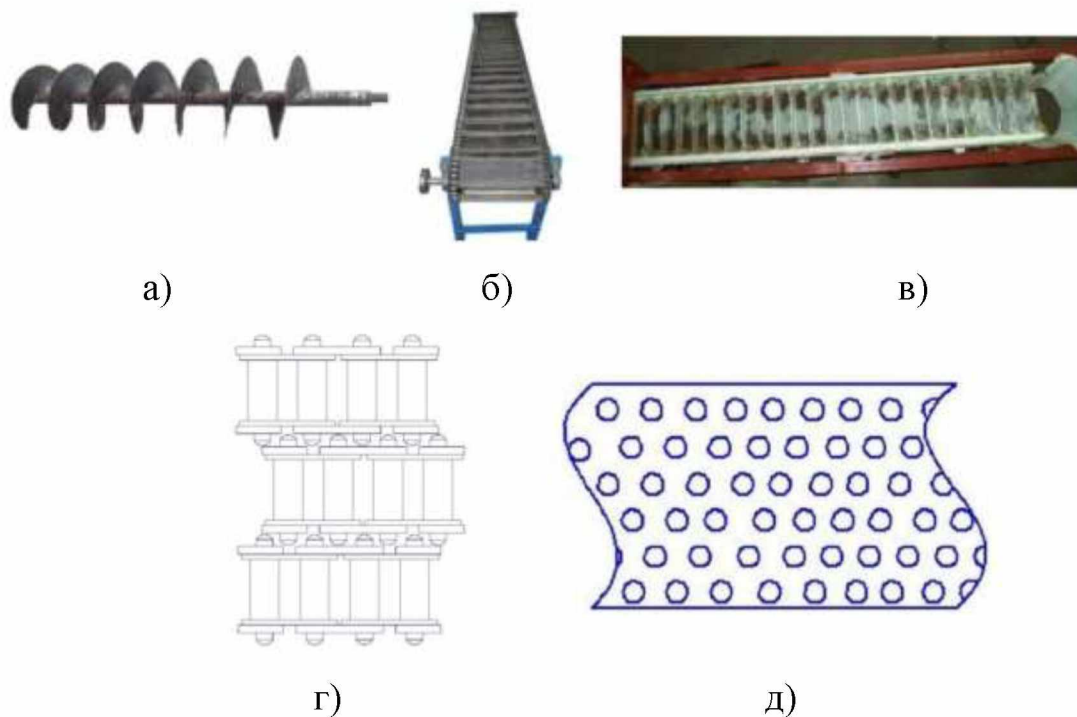


Рисунок 1.8 - Форми гріючих поверхонь зерносушарок контактного типу

Вони можуть бути різноманітної форми залежно від конкретних умов та методів використання при протіканні теплових процесів, а також виготовлятися з різноманітних струмопровідних матеріалів. Процес нагрівання будь-якого матеріалу до необхідної температури є витратним і потребує, найчастіше, використання великих обсягів енергії. Тому використання нагрівального елемента з високою продуктивністю та безпекою при його експлуатації є важливими факторами. Тим самим можна досягти високих показників ефективності обладнання, робота якого полягає у споживанні теплоти.

В даний час є велика кількість різних нагрівальних елементів. Їх можна поділити на кілька підгруп: трубчасті, плоскі, кільцеві, спіральні, гнучкі.

Крім того, пристрої для сушіння зерна можна розділити на вигляд робочого органу, що транспортує (рис.1.9) [19].



а - гвинтовий; б - скребковий; в - вібраційний короб (гуркіт); г - ланцюговий; д - гнучка пориста стрічка

Рисунок 1.9 - Робочі органи сушарок, що транспортують.

Робочими органами можуть бути:

– гвинт (рис.1.9 а) - робочий орган, який представляє собою стрижень з суцільною гвинтовою поверхнею вздовж поздовжньої осі, тобто. шнек, призначений для транспортування сипких матеріалів переміщенням вздовж обертової гвинтової поверхні всередині труби [1];

– скребковий транспортер (рис.1.9 б) - механізм для транспортування зерна за допомогою скребок, які кріпляться до 1-го або більшої кількості тяг у вигляді ланцюгів і опущених в товщу оброблюваного матеріалу;

– вібраційний короб (гуркіт) (рис.1.9 в) являє собою робочий орган, який здійснює зворотно-поступальні рухи з певною амплітудою коливань, а також з різним рельєфом поверхні [1];

– ланцюговий транспортер (рис.1.9 г) - це ланцюг, розташований по всій ширині робочої поверхні, що переміщає зерно, що висушується, в один шар за рахунок розташування матеріалу в окремих ланках [1];

– гнучка пориста стрічка (рис.1.9 д) - стрічка, що має комірки, рівні максимальному розміру зерна і переміщує його по нагрітій поверхні [1].

За кількістю робочих секцій зерносушарки поділяють на односекційні та багатосекційні. Багатосекційні пристрої являють собою робочі органи, які розташовуються паралельно один одному або послідовно [1].

При забезпеченні паралельності робочих органів можна збільшити пропускну здатність пристрою. Для зняття надмірної вологи за прохід необхідно встановити робочі органи послідовно.

Крім того, зерносушарки з контактним способом підведення теплоти можна поділити на кшталт вологовиділення. При примусовому видаленні вологи використовують вентилятори, а при природному вологу видаляється самостійно. [1].

Проаналізувавши весь існуючий ряд контактних зерносушарок, ми структурували всю їхню різноманітність за основними ознаками в одну класифікацію, яку можна вважати найбільш ясною для розуміння принципів роботи зерносушарок з контактним способом підведення теплоти. Це дозволить розробити пристрій для сушіння зерна з оптимальними типовими елементами і вузлами, правильне конфігурування яких дозволить забезпечити якісну обробку зерна.

### **1.3 Висновки до першого розділу**

1. Проведений аналіз типових та експериментальних конструкцій протруювачей насіння засвідчив їх широку різноманітність, різну ступень ефективності та енергоємності технологічного процесу хімічної обробки насіння. При цьому основними недоліками більшості є нерівномірність нанесення препарату на поверхню насіння при високій ймовірності пошкодження зерна під час його транспортування в камері обробки.

2. Як засвідчив аналіз конструкцій, то найбільш перспективним напрямком поліпшення процесу протравлювання є застосування протравлювача барабанного

типу, які можуть забезпечити високу продуктивність, належну якість обробки, меншу травмованість насіння та невисокі показники енергоємності процесу обробки.

## 2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Програма експериментальних досліджень

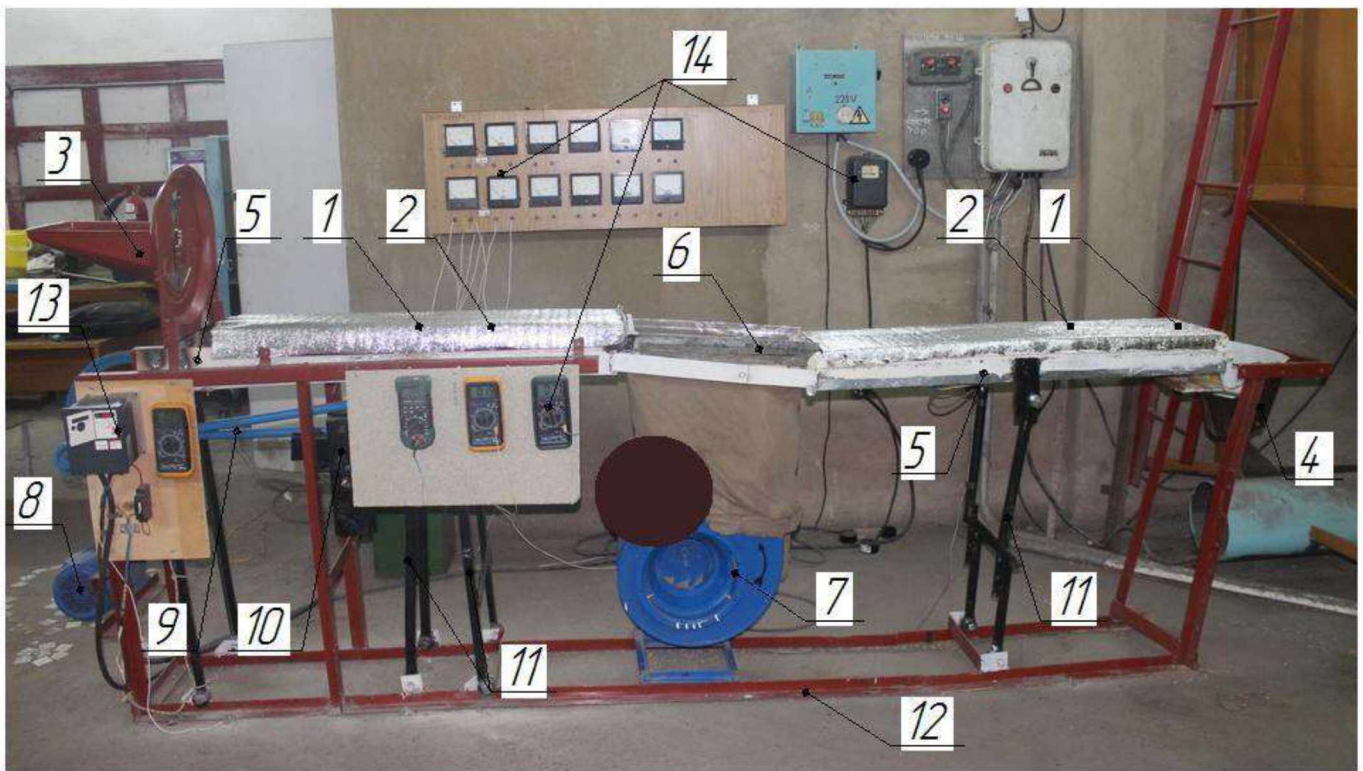
Для того щоб знайти оптимальні параметри і режими роботи зерносушарки, що пропонується, нами розроблена програма дослідження процесу сушіння зерна в лабораторних умовах, що передбачала:

1. Визначення аеродинамічних властивостей зерна для знаходження оптимальної швидкості руху повітряного потоку.

2. Дослідження процесу сушки зерна в установці для окреслення середньої температури гріючої поверхні, час перебування зерна в установці, швидкість та вологовідбір, температура зерна на виході з установки, що дозволить визначити питомі витрати енергії.

Для того, щоб виконати вище зазначену програму, нами була розроблена та виготовлена зерносушарка контактного типу з коливальним транспортуючим робочим органом, яка представлена на рисунку 2.1.

Лабораторна зерносушарка містить кожух, який із зовнішнього боку покритий теплоізоляцією. Усередині кожуха встановлений робочий орган (ТРО), що транспортує, виконаний двосекційним у вигляді коробів і встановлений з можливістю повідомлення йому коливань. Верхня поверхня коробів виконана ступінчастою теплопровідного матеріалу. Під щаблями коробів розташовані нагрівальні елементи. Короби ТРО розташовані послідовно один за одним таким чином, що друга секція розташована нижче за першу. Між секціями ТРО розташована перфорована скатна дошка, знизу якої підведено вентилятор. Короби ТРО встановлені на рухомих стійках, які у свою чергу кріпляться до рами. Коливальні рухи транспортуючого робочого органу повідомляє електродвигун через кривошипно-шатунний механізм. Щоб уникнути виникнення інерційних сил на шатун противаги встановлюється вантаж, маса якого дорівнює масі робочого органу, що транспортує.



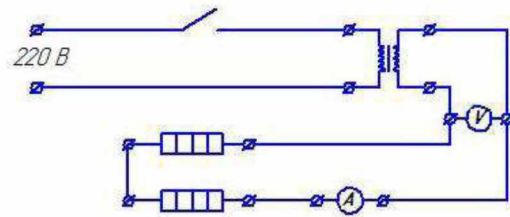
1 – кожух; 2 - теплоізолюючий матеріал; 3 – завантажувальний бункер; 4 - вивантажне вікно; 5 - транспортуючий робочий орган; 6 - скатна дошка; 7 – вентилятор; 8 – електродвигун; 9 - кривошипно-шатунний механізм; 10 - противагу; 11 – рухомі стійки; 12 – рама; 13 - частотний перетворювач; 14 - контрольно-вимірювальна апаратура

Рисунок 2.1 - Лабораторна зерносушарка контактного типу з коливальним транспортуючим робочим органом.

У розробленій зерносушарці використовували автотрансформатор однофазний масляний з природним охолодженням і з можливістю регулювання напруги під навантаженням АОМН-40-220-75 (рис. 2.2 а), який необхідний для зміни напруги 220 В частотою 50/60 Гц. У нашому випадку змінюється напруга на ТЕНах [5].



а)



б)

Рисунок 2.2 - Автотрансформатор АОМН-40-220-75 (а) зі схемою підключення ТЕНів (б)

Внаслідок зміни напруги збільшується або зменшується температура ТЕНів, що сприяє зміні температури теплонагрівальних елементів.

Електрична схема підключення теплонагрівальних елементів з автотрансформатором вказана на рисунку 2.2 б.

Також у розробленій зерносушарці потрібно регулювати швидкість руху зерна. Для цього змінюють частоту коливань транспоруючого робочого органу, які безпосередньо залежать від частоти обертання валу двигуна. Домогтися необхідного показника частоти можливо такими способами, як:

- 1) зміною передавального відношення;
- 2) зміною частоти обертання валу двигуна.

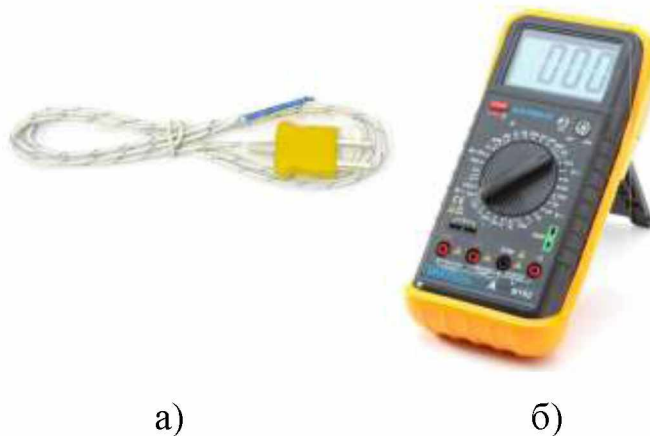
На розробленій нами установці частота коливань робочого органу змінюється другим способом. Для цього використовували перетворювач частоти Altivar 312 для асинхронних електродвигунів (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Прилад зміни частоти асинхронного двигуна "Altivar 312":

Частотний перетворювач Altivar 312 має наступні параметри: гранична напруга живлення знаходиться в діапазоні 323...550 В; частота мережі – 47,5...63 Гц. Цей прилад може бути підключений до двигуна потужністю  $\leq 3$  кВт. Частотний перетворювач має 2 способи управління: локальний (безпосередньо на частотному перетворювачі) і дистанційний (регулювання частоти обертання двигуна на відстані). У разі частотний перетворювач використовувався локально.

Розроблена зерносушарка містить дві секції транспортуючого робочого органу, температуру гріючих поверхонь яких потрібно постійно контролювати. Для зняття показників температури в нашому випадку використовувалися термопари К-типу, що мають високу точність вимірювання температури ( $\pm 0,01$  °С) (рис. 2.4 а), а також мультиметри Mastech MY62 (рис. 2.4 б), які використовували для візуалізації отриманих значень. ній температури. З їх допомогою можна вимірювати температуру в діапазоні -20...1000 °С.



а - термопара К-типу; б - мультиметр цифровий Mastech MY62

Рисунок 2.4 - Контрольно-вимірювальне обладнання:

Між секціями робочого органу, що транспортує, встановлена перфорована скатна дошка, через яку проходить повітряний потік, створюваний вентилятором. Для визначення температури та швидкості руху повітряного потоку використовували термоанемометр СЕМ DT-618 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 - Термоанемометр СЕМ DT-618

За допомогою даного термоанемометра можна визначити максимальні, середньостатистичні та мінімальні значення таких показників, як температура (в діапазоні від 0 до +60 °С) та швидкість руху повітряного потоку (від 0,3 до 45 м/с) з похибкою вимірів 0,1 °С і 3% відповідно. Дані виводяться на РК-екран одночасно показуючи температуру і швидкість повітряного потоку.

Таким чином, застосовуючи вище вказане обладнання зміни основних режимних показників пристрою для сушіння зерна, можливо провести достовірні експериментальні дослідження.

## 2.2 Методика визначення аеродинамічних властивостей зерна

У запропонованій зерносушарці важливими є такі властивості зерна, як аеродинамічні. Суть зазначених властивостей зводиться до особливості поведінки зерна в повітряному потоці.

Зерно, рухаючись скатною дошкою, зустрічає опір повітряному потоку. Його характеристики залежать від різних показників, до яких відносяться маса, стан поверхні і лінійні розміри зерна, відносна швидкість руху і розташування зерна, а також стан повітряного потоку. Сила тиску повітряного потоку можна знайти з наступного виразу [10]:

$$P_{en} = 0,124 K_c S_m (v_6 - v_3)^2, \quad (2.1)$$

де  $K_c$  - коефіцієнт опору, що враховує аеродинамічні властивості зерна;

$S_T$  - площа найбільшого перерізу тіла в напрямку, перпендикулярному до швидкості повітряного потоку, м<sup>2</sup>;

$v_B$  - абсолютна швидкість повітря (швидкість витання), м/с;

$v_z$  – абсолютна швидкість зерна, м/с.

Коефіцієнт парусності своєю чергою перебуває так [10]:

$$K_n = \frac{K_\gamma F_m}{G_z}, \quad (2.2)$$

де  $G_z$  - вага зерна, Н;

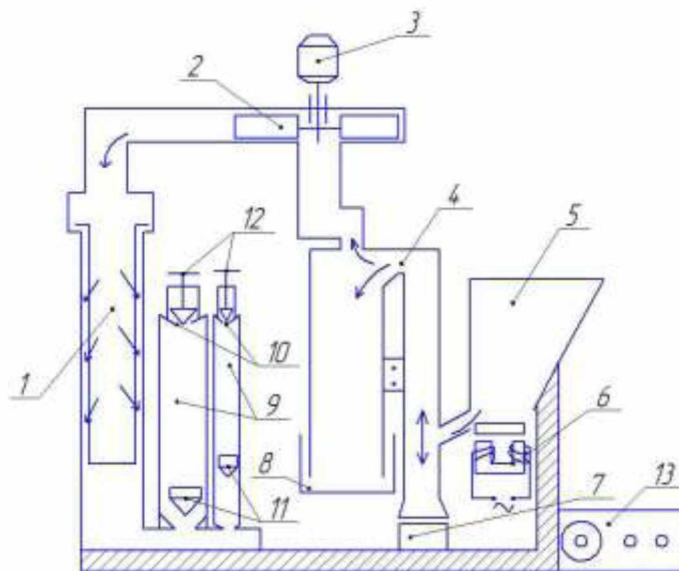
$\gamma$  - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Варто зауважити, що аеродинамічні властивості зерна характеризуються таким показником, як швидкість витання (руху повітряного потоку), при якому врівноважуються сила опору повітря та сила тяжіння зерна. Знаходиться цей показник за формулою [10]:

$$v_e = \sqrt{\frac{g}{K_n}}. \quad (2.3)$$

Зерно більшості культур піднімається повітря при швидкості 8...12 м/с. У нашому випадку застосовувалося зерно тритікале. Щоб точно визначити швидкість витання цієї культури, нами використовувалася лабораторна установка К-293 фірми «Петкус» (рис. 2.6).

Вітрильний класифікатор К-293 «Petkus» працює наступним чином. Включають вентилятор, який створює повітряний потік в аеродинамічній трубі, що рухається з постійною швидкістю. Зерно засипають у завантажувальний бункер, звідки за допомогою вібратора потрапляє до аеродинамічної труби. Під дією повітряного потоку легка зернівка відлітає і падає в приймач 8, а важка падає в приймач 7. Повітря, звільнене від зважених частинок, нагнітається вентилятором через фільтр в ротаметр і видаляється назовні через дросельні отвори. За допомогою поплавців, що піднімаються в ротаметрах, фіксують значення за шкалою, нанесеною на ротаметр, після чого звіряють із тарувальним графіком, і визначають швидкість потоку повітря.



1 – фільтр; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – електродвигун; 4 - аеродинамічна труба; 5 – завантажувальний бункер; 6 – вібратор; 7, 8 – приймач; 9 – ротаметр; 10 - отвори, що дроселюються; 11 - поплавець; 12 – рукоятки; 13 – пульт управління

Рисунок 2.6 - Вітрильний класифікатор К-293 «Petkus».

Швидкість подачі зерна регулюється за допомогою рукоятки, розташованої на пульті керування 13.

### 2.3 Методика дослідження зерносушарки контактного типу

Рамки зміни основних незалежних факторів процесу видалення надмірної вологи із зерна в запропонованому нами пристрої знаходилися спираючись на її конструктивні особливості, а також базуючись на існуючих дослідженнях і отриманих результатах пошукових експериментів.

Для сконструйованого пристрою були взяті наступні рамки зміни незалежних факторів: температура першої і другої секції гріючої поверхні регулюється в діапазоні 50 ... 155 °С, час знаходження зерна в установці - 10 ... 20 с.

Лабораторні дослідження сушіння зерна в сконструйованому устрої проходили наступним чином. Насамперед було підготовлено зерно, кількість якого буде достатньою для проведення експерименту (стосовно нашого випадку було взято зерно тритикале масою 1,5 кг). При визначенні маси зерна застосовували ваговий прилад ПВ-6 (рис. 2.7). Похибка виміру зазначеного обладнання має такі діапазони: для маси до 3 кг - 1 г; від 3 до 6 кг – 2 г.



1 – дисплей; 2 - скидання показань маси тари та компенсація маси тари на індикаторах маси; 3 – корекція навантажених ваг; 4 - ампула рівня

Рисунок 2.7 - Ваги електронні ПВ-6.

Перед проведенням операції сушіння, необхідно визначити вологість.

Після цього запускали зерносушарку, при цьому провівши її налаштування та встановивши потрібні режими роботи. Щоб це здійснити, нами були такі параметри, як температура першої і другої секції ТРО і час знаходження зерна в установці.

При визначенні часу знаходження зерна в установці необхідно визначити, за який час пройде зерно робочий орган, що транспортує.

Для цього було побудовано таріювальний графік залежності часу руху зерна ТРО від частоти обертання валу електродвигуна (рис. 2.8).

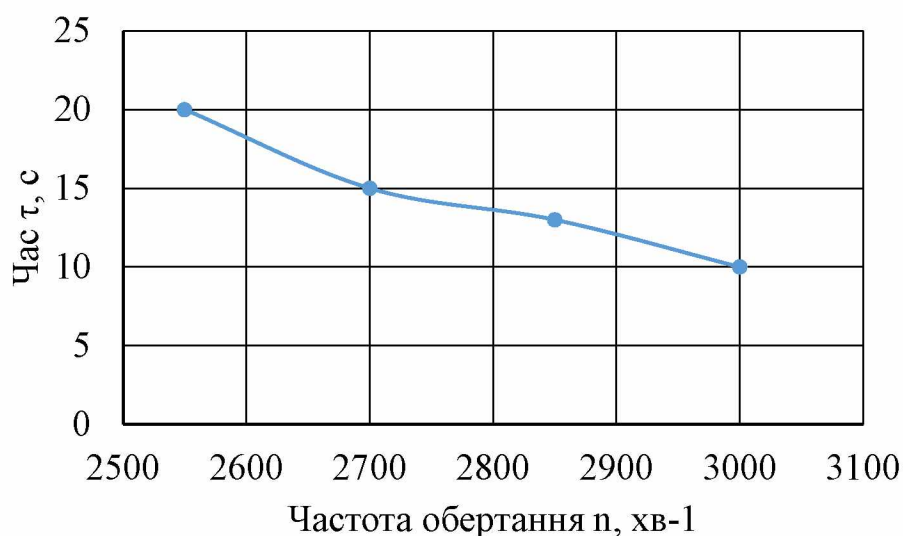


Рисунок 2.8 - Залежність часу руху зерна ТРО від частоти обертання валу електродвигуна  $n$

Для побудови графіка нами задавалися необхідні значення частоти обертання валу електродвигуна, з яких визначалося час перебування зерна у пристрої.

Для цього в зерносушарці при видаленні надмірної вологості із зерна в одну порцію поміщали зерно, попередньо забарвлене, і фіксували час, протягом якого воно проходило від початкової точки сушіння, тобто. від завантажувального бункера, до кінцевої (вивантажувального вікна). Вимірювали за допомогою секундоміра електронного типу КТJ TA-228.

Для отримання точнішого значення часу знаходження зерна у пристрої експеримент проводили з триразовою повторністю з метою розрахувати середнє значення.

Після визначення часу знаходження зерна в установці можна розрахувати швидкість його руху, яка визначається за формулою:

$$V_s = \frac{l_{mpo}}{t}, \quad (2.4)$$

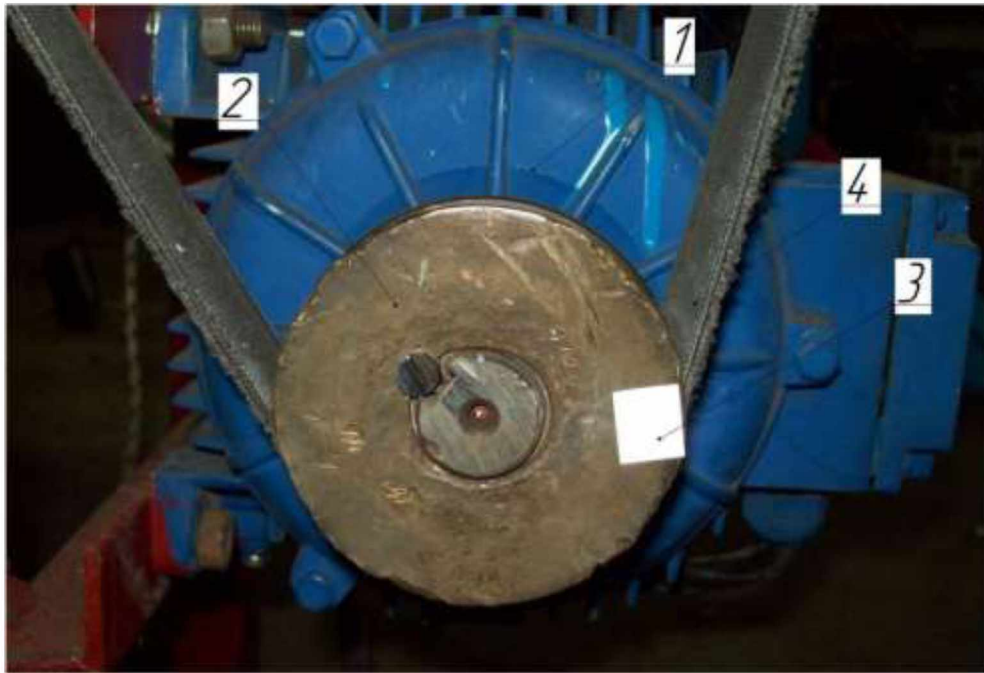
де  $l_{mpo}$  - довжина робочого органу, що транспортує, м;

$t$  – час знаходження зерна в установці, с.

Визначення частоти обертання валу електродвигуна здійснювали із застосуванням тахометра цифрового типу Sinometer DT6234B, точність якого становить 0,05%, діапазон вимірювання 2,5 ... 9999 хв<sup>-1</sup>. При значенні вище 60 об/хв швидкість поновлення результату становить 0,8 с.

Замір проводиться наступним чином. На шків електродвигуна приклеювали світловідбивну пластинку розміром 10x10 мм (рис. 2.9). Далі запускали електродвигун і навпроти шківа встановлювали тахометр, після чого направляли лазерний промінь приладу на світловідбиваючу пластину і зчитували показники з дисплея.

При напрямку лазерного променя на світловідбивну смужку прилад зчитував показання та виводив їх на дисплей.



1 – електродвигун; 2 – шків; 3 - світловідбивна пластина; 4 - ремінь клиновий.

Рисунок 2.9 - Привід робочого органу, що транспортує.

Встановивши необхідні налаштування зерносушарки, в завантажувальний бункер засипали попередньо підготовлені порції зерна і заміряли потужність, споживану нагрівальними елементами першої і другої секції ТРО на нагрівання робочої поверхні, а також потужність, що витрачається електродвигуном для приведення в рух ТРО.

Крім того, проводили вимір кількості висушеного зерна  $m$  в установці за певний проміжок часу ( $t = 15$  с):

$$z = 4 \cdot \frac{m}{t}. \quad (2.5)$$

Далі здійснювався замір температури оброблюваного зерна після закінчення сушіння термометром інфрачервоного типу марки Mastech моделі MS6530. Похибкою вимірювання температур варіюється в межах  $-20 \dots 50$  °C  $\pm 2,5$  %, а при температурах  $51 \dots 53,7$  °C  $\pm 1,0$  %

Робота інфрачервоного термометра проходить в такий спосіб. Натисканням на курок 15 прилад включається, після чого лазерним прицілом, який включається за допомогою кнопки 4, здійснюють вибір поверхні, на якій буде проводитися вимірювання температури. Щоб вивести цифрове значення на екран, необхідно

повторно натиснути на курок. Кнопка 3 потрібна для вибору необхідного значення температури вимірюваної області: середнє, мінімум, максимум, різниця між максимальним та мінімальним значенням вимірювання.

При вимірі температури на виході установки показник не повинен перевищувати 40 ° С для насінневого зерна та 60 ° С - для продовольчого.

Потім висушене зерно охолоджують до температури навколишнього середовища та заміряють його вологість з триразовою повторністю.

Після доведення температури висушеного зерна до температури, що відповідає навколишньому середовищу, вимірювали вологість вологоміром Will-55 за методикою, що відповідає виміру вологості перед сушінням.

Для отримання середнього значення досліди були зроблені в кожній точці плану експерименту по три рази. Знайдені під час експерименту показники застосовувалися визначення значень критерію оптимізації.

#### **2.4 Вибір рівнів варіювання факторами**

Грунтуючись на дослідженнях процесу сушіння, які проводилися раніше, результатах пошукових дослідів, а також виходячи з конструкції пристрою, нами взяті наступні рамки зміни основних незалежних факторів процесу видалення надлишкової вологи із зерна: середня температура гріючих поверхонь ТРО змінювалася від 112,5 до 137,5 ° С, швидкість руху насіння - від 0,14 до 0,28 м/с (табл.3.1).

За критерій оптимізації було взято такий показник, як питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи  $q$ , МДж/кг.

У свою чергу результати експериментальних досліджень повинні достатньо і достовірніше показувати вплив факторів на параметр оптимізації. Тому план експерименту затверджуємо за план другого порядку. Такі плани надають можливість побудувати повне квадратичне рівняння регресії виду [4]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (2.6)$$

Таблиця 3.1 – Рівні варіювання незалежних факторів

Рівні варіювання	Фактор	
	Середня температура гріючої поверхні, С	Швидкість руху зерна, м/с
Верхній (+1)	112,5	0,14
Основний (0)	125	0,21
Нижній (-1)	137,5	0,28
Інтервал варіювання, $\Delta x_i$	12,5	0,07

Середня температура гріючої поверхні береться з розрахунку температури першої та другої секції ТРО.

Число членів рівняння регресії  $N$  год виражається формулою [4]:

$$N_q = 0,5(n+1)(n+2). \quad (2.7)$$

Кількість коефіцієнтів регресії буде такою самою. У нашому випадку  $n = 2$ , тому  $N = 6$ . Виходячи з цього видно, що для їх визначення потрібно проводити досліди, кількість яких не повинна становити менше ніж 10.

Головною перевагою та перевагою некомпозиційних планів другого порядку (Бокса-Бенкіна, Хартлі та ін.) є змінність факторів лише на трьох рівнях: верхньому (+1), нижньому (-1) та основному (0). Виходячи з цього, проводимо некомпозиційне планування експерименту.

Виконуємо нормалізацію факторів, при якій здійснюється лінійне перетворення факторного простору з перенесенням початку координат в центр експерименту і вибір масштабу по осях в одиницях варіювання факторів за формулою [4]:

$$\bar{x}_i = \frac{(\bar{x}_i - x_{i0})}{\Delta x}, \quad (2.8)$$

де  $\bar{x}$  – нормалізоване значення фактора;  $x_{i0}$  - натуральне значення фактора на основному рівні;  $x_i$  – натуральне значення фактора;  $\Delta x_i$  - натуральне значення інтервалу варіювання фактору [4]:

$$\Delta x_i = 0.5(x_i^g - x_i^h), \quad (2.9)$$

де  $x_i^g, x_i^h$  - значення фактора відповідно на верхньому та нижньому рівнях.

Отримана математична модель у кодованих значеннях факторів дозволить оцінити рівень впливу на параметр оптимізації як кожного з них, так і творів факторів (при суттєвості коефіцієнтів рівняння регресії).

## **2.5 Висновки до другого розділу**

1. На основі аналізу теоретичної інформації щодо видалення надлишкової вологи із зерна виявлено два незалежні фактори процесу сушіння зерна: середня температура гріючої поверхні  $t_{\text{п}}$ , швидкість руху зерна  $v_{\text{з}}$ .

2. Реалізація розробленого плану експерименту дозволить отримати адекватну математичну модель, яка з достатнім ступенем точності охарактеризує вплив кожного із незалежних факторів та їх поєднань на параметр оптимізації процесу сушіння зерна. Як такий параметр нами прийняті питомі витрати теплоти на випаровування із зерна вологи.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Результати основного експерименту та визначення оптимальних режимів роботи зерносушарки контактного типу

У першу чергу були проведені дослідження впливу швидкості руху повітря на такі показники зерна, як кінцева вологість і зміна температури оброблюваного матеріалу після проходження скатної дошки. Результати експерименту показали, що зміна швидкості повітряного потоку в запропонованому пристрої від 1 м/с до 3,5 м/с фактично не мають будь-якого впливу на процес видалення надлишкової вологи із зерна. Це тим, що з максимальної пропускної спроможності установки 5 кг/с і досягаємомакимальному зніманні вологи із зерна у ній 3,7 % у внутрішній простір надходить всього 0,0185 кг/с вологи. Для її видалення достатньо швидкості повітря, яку йому повідомляє за свого руху ТРО установки. Тому необхідність у надходженні додаткових обсягів повітря у внутрішній простір установки відсутня.

Пропонована зерносушарка має конструктивну особливість: розділення ТРО на дві секції та встановлення між ними скатної дошки, через яку проходить повітря. Кожна секція ТРО має можливість регулювання температури гріючої поверхні незалежно один від одного. Виходячи з цього, дослідження проводили за:

- постійній температурі першої секції ТРО та зміні температури другої секції ТРО;
- постійній температурі другої секції ТРО та зміні температури першої секції ТРО.

При проведенні експериментальних досліджень установки для сушіння зерна використовували таку зернову культуру, як тритикале. Вибір даної культури обумовлений тим, що вона має підвищену зимостійкість, менш вимоглива до родючості ґрунтів, а також утворює більшу кількість зерен у колосі, ніж пшениця або жито. Крім того, посівних площ, на яких висівають тритикале, з кожним роком стають більше, що доводить її невибагливість та затребуваність.

Рівняння регресії, що показує вплив основних незалежних факторів процесу сушіння зерна тритикале на енерговитрати, що припадають на одиницю випареної вологи, в натуральних значеннях факторів має такий вигляд:

$$q = 48.1 - 0.7583t_n + 30.5v_3 + 0.0034t_n^2 - 0.38t_nv_3 - 32.07v_3^2, \quad (3.1)$$

де  $q$  - енерговитрати, що припадають на одиницю випареної вологи, МДж/(кг вологи);

$v_3$  - швидкість руху повітря, м/с;

$t_n$  - середня температура поверхні, що гріє, °С.

Графік поверхні відгуку, який характеризує вплив швидкості руху зерна і середньої температури поверхні, що гріє, на енерговитрати, що припадають на одиницю випареної вологи, зображено на рисунку 3.1.

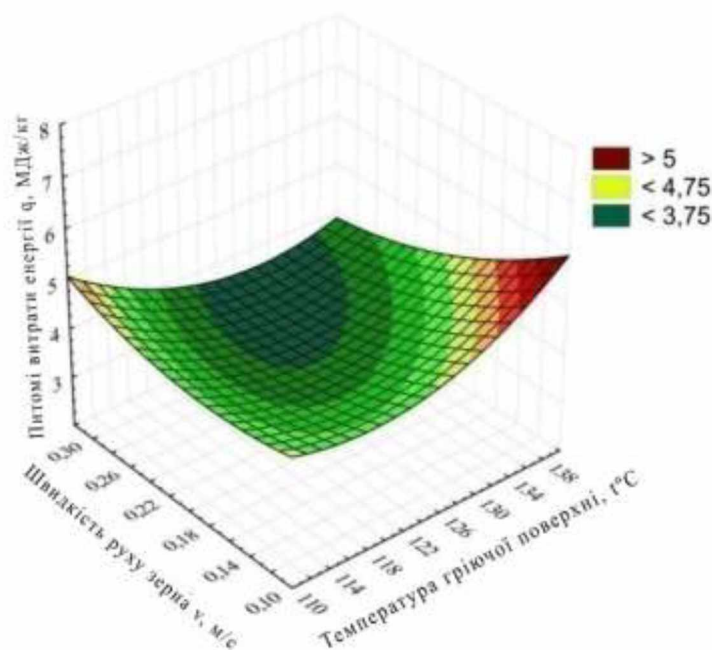


Рисунок 3.1 - Поверхня відгуку від взаємодії швидкості руху зерна та середньої температури гріючої поверхні.

При кодуванні значень факторів рівняння (4.1) отримаємо наступне:

$$Y = 3.71 + 0.034x - 0.334y + 0.526x^2 - 0.43xy + 0.27y^2, \quad (3.2)$$

де  $Y$  – енерговитрати, що припадають на одиницю випареної вологи;

$x$  - середня температура гріючої поверхні  $t$ ;

$y$  - швидкість руху зерна в установці  $v$ .

Порівняння коефіцієнтів другого рівняння показав, що на параметр оптимізації при сушінні зерна тритикале у запропонованій установці з контактним підведенням теплоти з лінійних членів найбільше впливає середня температура поверхні, що гріє  $x$ , а найменше - швидкість руху зерна  $y$ .

Після формалізації процесу сушіння та отримання наочного уявлення про поверхні відгуку, був виконаний їх аналіз методом двомірних перерізів з використанням закодованих величин факторів.

Аналіз побудованих двомірних перерізів поверхні відгуку дає можливість порівняння значень критерію оптимізації, які відповідають змінам рівнів кожної пари факторів, що задаються.

Двовимірний переріз поверхні відгуку, що відображає залежність енерговитрат, що припадають на одиницю випареної вологи від спільного впливу температури поверхні та швидкості руху зерна, представлено на рисунку 3.2.

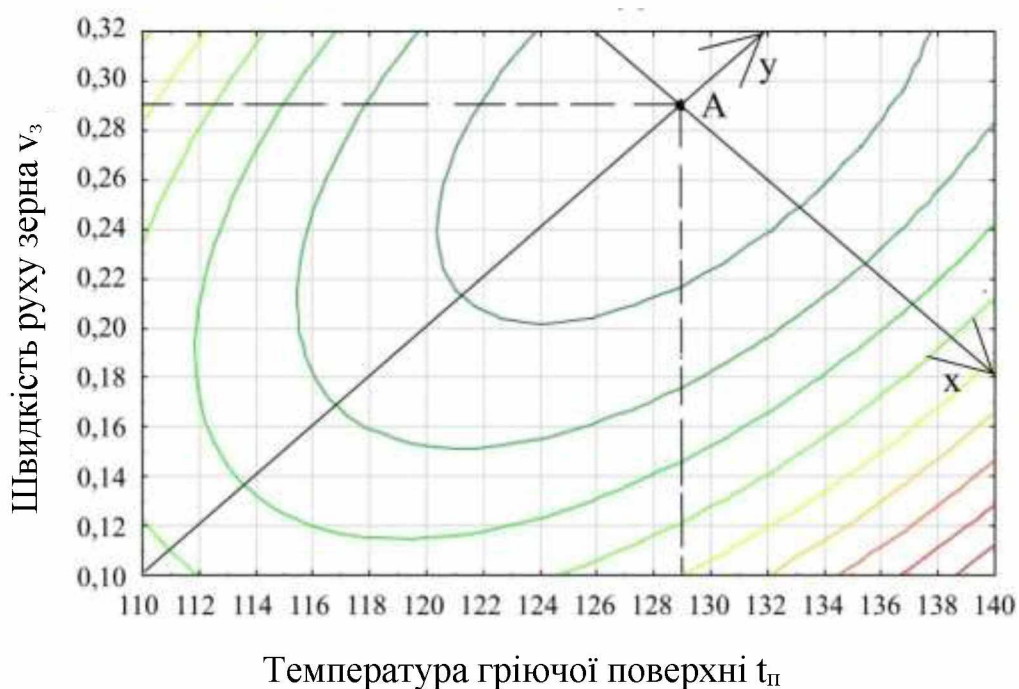


Рисунок 3.2 - Двовимірний переріз поверхні відгуку, що характеризує вплив  $v_3$  і  $t_{II}$  на

$$Q_{\text{шт}}$$

Аналіз рисунка 3.2 показав, що оптимальні значення незалежних факторів:  $v_3 = 0,29$  м/с;  $t_{II} = 129$  °С, яка досягається при температурі першої секції ТРО 150 °С та температурі другої секції ТРО 108 °С. При цьому енерговитрати, що припадають

на одиницю випареної вологи, мають невелике значення і становлять 3,57 МДж/(кг вологи).

З урахуванням отриманих оптимальних значень можна визначити максимальну пропускну здатність пристрою. Однак при даній швидкості руху зерна, крім максимальної, що дорівнює 375 кг/год, можна забезпечити ще три варіанти пропускну здатності, які залежать від ступеня відкриття заслінки на завантажувальному бункері, а саме: 79 кг/год, 221 кг/год та 300 кг/год. На перший погляд може здатися, що найбільш вигідна максимальна пропускну здатність. Однак експериментальні дослідження показали, що при її використанні не досягається необхідна якість сушіння, так як зерно на початку руху по дошці починає звантажуватися, після чого розподіляється на ній в кілька шарів. Це не забезпечує здійсненності однієї з ключових умов сушіння зерна при контактному способі, а саме, забезпечення тонкошарового переміщення матеріалу, що висушується, для його рівномірного нагріву. Тому вибираємо пропускну здатність установки, при якій буде виконуватися умова тонкошарового руху матеріалу, що обробляється. Рациональна пропускну здатність при забезпеченні зазначеної вище умови становить 221 кг/год.

Так як оптимальні значення обраних нами незалежних факторів процесу сушіння забезпечуються при зміні пропускну спроможності установки в заданих межах для першого варіанту досліджень (постійна температура першої секції ТРО і змінюється температура другої секції ТРО), то питомі витрати енергії на процес сушіння зерна істотно не змінюються та становлять 3,57 МДж/(кг вологи) на раціональному режимі роботи. Цей факт було перевірено та підтверджено у процесі подальших досліджень установки.

Аналогічним чином був виконаний розрахунок для випадку, коли температура поверхні, що гріє, другої секції ТРО постійна, а температура першої секції змінюється. В результаті отримано відповідний двовимірний переріз поверхні відгуку (рис. 3.3).

За поданим на рисунку 3.3 двовимірним перерізом можна визначити, що оптимальна температура поверхні  $t_p$  становить приблизно 121 °С. Однак точка оптимального значення швидкості руху зерна  $v_3$  знаходиться за межами області

дослідження. Отже, для розглянутого випадку оптимальними значеннями незалежних факторів будуть  $v_3 = 0$  м/с і  $t_{\text{г}} = 121$  °С. Але при швидкості руху зерна, що дорівнює нулю, воно перебуватиме в нерухомому стані, а безперервний процес сушіння перейде в категорію періодичних. Цей випадок при контактному підведенні теплоти супроводжується локальним перегрівом матеріалу, що висушується і, відповідно, різким зниженням якості готового продукту. Тому витрати енергії на процес сушіння слід мінімізувати з урахуванням забезпечення заданої пропускної спроможності установки. Аналіз практики використання селекційних сушарок показав, що їхня пропускна здатність повинна бути не менше 50 кг/год, що забезпечується при  $v_3 = 0,06$  м/с.

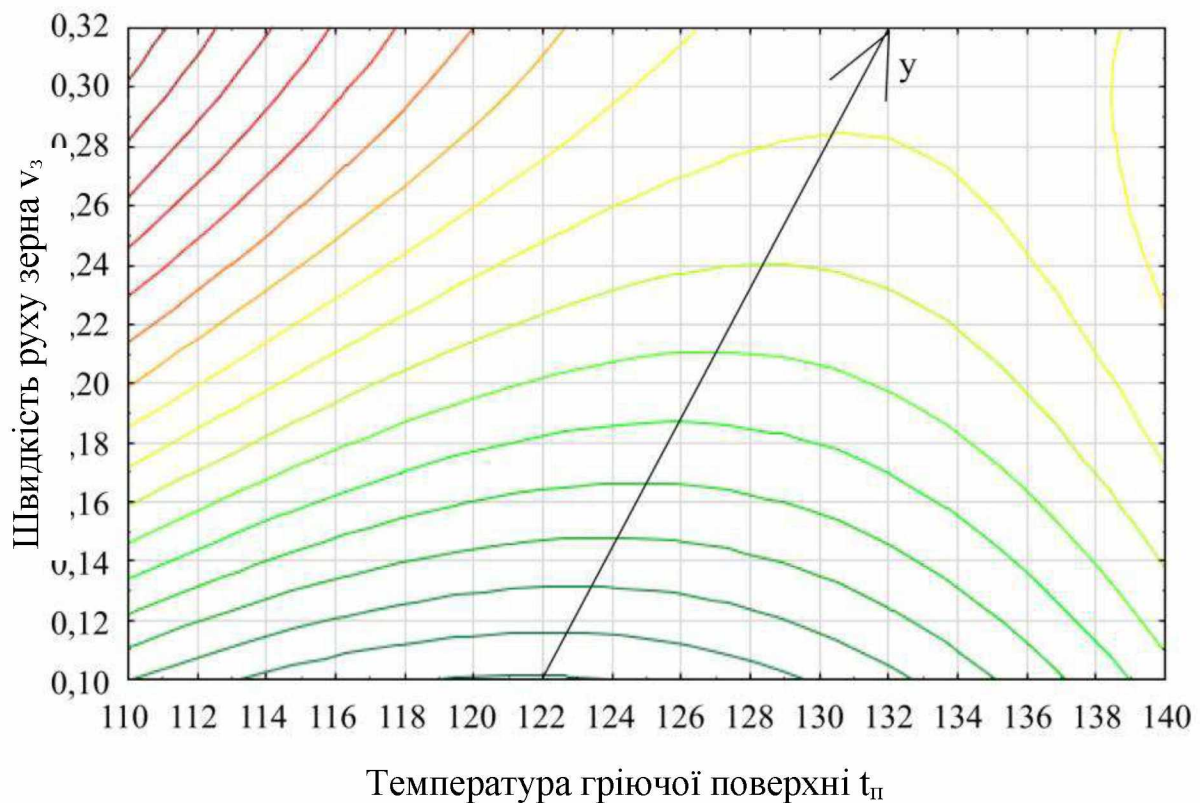
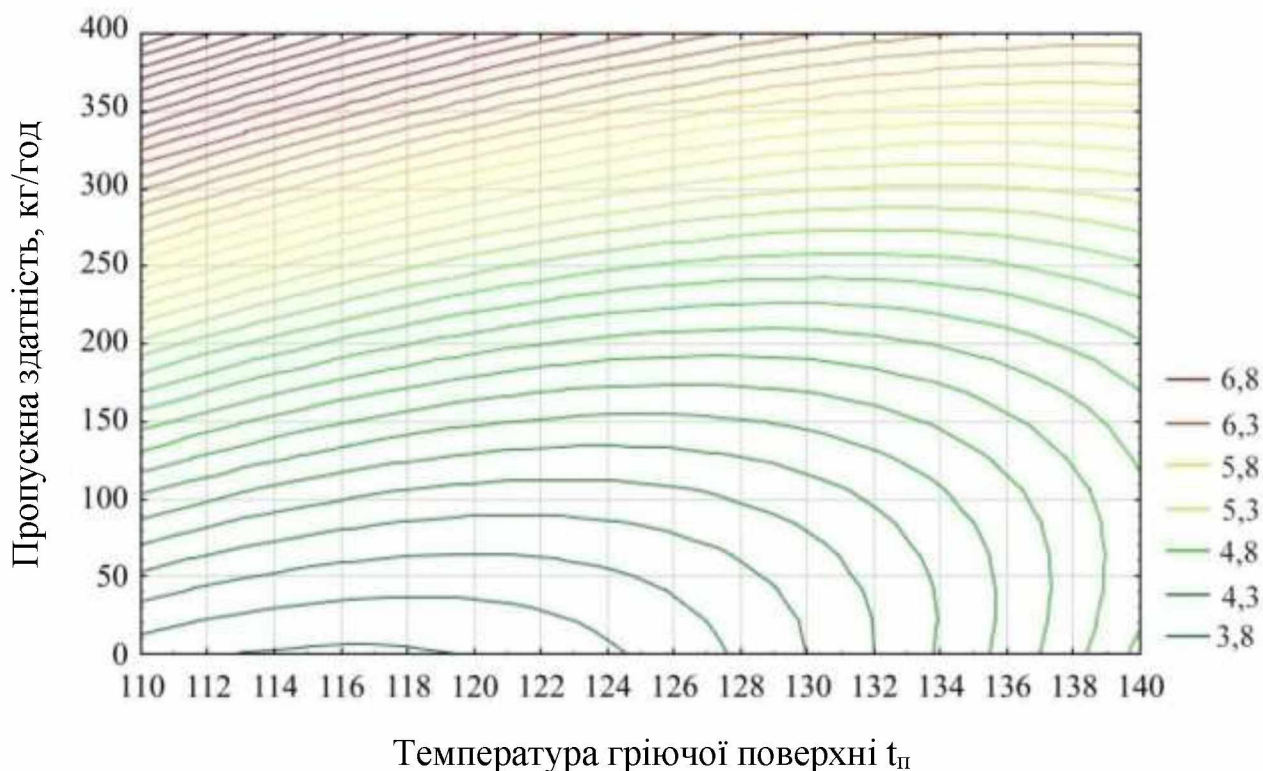
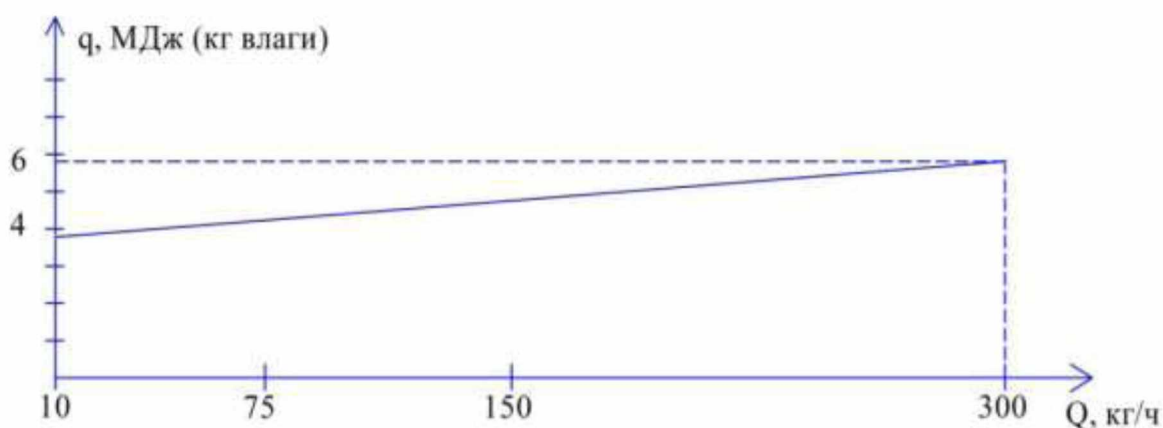


Рисунок 3.3 - Двовимірний переріз поверхні відгуку, що характеризує вплив  $v_3$ , і  $t_{\text{г}}$  на  $q_{\text{пит}}$

Для того, щоб визначити оптимальну швидкість руху зерна, побудуємо двовимірний переріз поверхні відгуку, що характеризує вплив пропускної здатності  $Q$  і температури гріючої поверхні  $t_{\text{г}}$  на енерговитрати, що припадають на одиницю випареної вологи  $q_{\text{пит}}$  (рис. 3.4 а).



а)



б)

Рисунок 3.4 – Двовірне переріз поверхні відгуку, що характеризує вплив  $Q$  і  $t_{гр}$  на  $q_{пит}$  (а) та залежність (б) питомих витрат енергії від пропускної спроможності установки.

Проаналізувавши отриманий двовірний переріз можна зробити висновок, що оптимальною є пропускна здатність від 10 кг/год до 300 кг/год. При пропускній здатності  $Q = 10$  кг/год питомі витрати енергії становлять близько 3,8 МДж (кг вологи), а при  $Q = 300$  кг/год даний показник становить приблизно 5,8 МДж (кг вологи). Для наочного уявлення про характер зміни питомих витрат енергії в

залежності від пропускної здатності пристрою був побудований відповідний графік (рис. 3.4 б).

Аналіз графіка показав, що в межах області експерименту при відносно невеликій різниці питомих витрат енергії пропускна здатність істотно різниться. Так, при збільшенні пропускної здатності пристрою в 30 разів питомі витрати енергії збільшуються всього в 1,5 рази, тому найбільш ефективно використання пристрою при максимальній пропускній здатності. Однак у цьому випадку, як уже було сказано вище, зерно рухається по нагрітій поверхні в кілька шарів, що погіршує якість висушеного матеріалу. Тому для забезпечення тонкошарового руху зерна оптимальна пропускна здатність  $Q = 200$  кг/год. Така пропускна здатність забезпечується за швидкості руху зерна  $v_z = 0,15$  м/с.

Таким чином, для другого варіанта досліджень (постійна температура другої секції ТРО та змінна температура першої секції ТРО) ми отримали наступні раціональні значення незалежних факторів:  $\tau = 18$  с,  $v_z = 0,15$  м/с,  $t_{\text{п}} = 125$  С. При цьому питомі витрати енергії на процес сушіння зерна становлять 4,2 МДж/(кг вологи).

### 3.2 Висновки до третього розділу

1. На підставі результатів проведених лабораторних досліджень розроблено адекватні математичні моделі процесів сушіння зерна у запропонованій зерносушарці.

2. Аналіз отриманих математичних моделей процесу сушіння зерна дозволив виявити оптимальні значення основних незалежних факторів, при яких енерговитрати на одиницю маси випарованої вологи із зерна тритикале  $q_{\text{пит}}$  становлять 3,57 МДж/кг вологи: температура першої секції ТРО – 150 °С, температура другої секції ТРО 108 °С (середня  $t_{\text{п}} = 129$  °С), час сушіння зерна  $\tau_{\text{опт}} = 10$  с, швидкість руху зерна  $v_z = 0,29$  м/с. Пропускна здатність пристрою при цьому становить 221 кг/год.

## 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Екологічна експертиза

Основними нормативними показниками екологічності техніки, технологій, матеріалів є гранично допустимі викиди в атмосферу і гранично допустимі стоки в гідросферу. До нормативним показникам екологічності технічних систем відносяться також допустимі рівні фізичних впливів (шуму, вібрації, електромагнітних полів і т.п.), що забезпечують гранично допустимі умови в жилих зонах. Нормативні показники є основою для проведення екологічної експертизи, і досягається шляхом підвищення екологічності проектів промислових об'єктів, обладнання та технологічних проектів.

Екологічна експертиза техніки, технологій, матеріалів буває суспільного і державного. Державна екологічна експертиза - розгляд документації техніки, технологій, матеріалів, що проводиться експертними підрозділами органів державного управління в галузі природокористування і охорони навколишнього середовища на загальнодержавному і регіональному рівні.

Громадська екологічна експертиза проводиться громадськими організаціями, основним напрямком діяльності яких є охорона навколишнього природного середовища, в тому числі і проведення екологічної експертизи, і які зареєстровані в установленому порядку.

Головним завданням екологічної експертизи є визначення повноти та достатності заходів щодо забезпечення необхідного рівня екологічної безпеки техніки, технологій, матеріалів, в тому числі: визначення відповідності проектних рішень, визначення повноти та достатності відображення технічних показників, що характеризують рівень впливу на навколишнє середовище, відповідність встановленим природоохоронним нормативам, оцінка повноти та ефективності заходів щодо попередження можливих аварійних ситуацій, оцінка вибору середовищ і методів контролю впливу техніки, технологій, матеріалів, оцінка способів і засобів утилізації або ліквідації технічних об'єктів, визначення повноти достовірності та наукової обґрунтованості проведеної оцінки впливу на навколишнє середовище.

Об'єктами експертизи є також проекти технічної документації на нову техніку, технологію і матеріали, речовини, сертифіковані товари і послуги, які входять в перелік, що затверджується спеціально уповноваженим державним органом у сфері екологічної експертизи, обумовлені в законі України "Про охорону навколишнього природного середовища", прийнятий 25 червня 1991 року на третій сесії Верховної Ради України, та законом „Про екологічну експертизу” від 9 лютого 1995 р. [13,14].

Основним завданням екологічної експертизи є надання загальної оцінки впливу об'єктів аналізу на навколишнє середовище, як на етапі затвердження проекту, роботи підприємства, так і при його реконструкції, розширення, складання висновку та створення рішення про затвердження або відмови від проекту, обмеження масштабів виробництва; примушування або застосування нових природозахисних пропозицій.

Не зважаючи на вид екологічної експертизи, передбачаються роботи з вивченням проектної або передпроектної документації, проектами планів, договорів або іншої подібної документації, зокрема на кінцевій стадії їх розробки.

Екологічна експертиза встановлює потенційні екологічні наслідки функціонування, будівництва або розширення підприємства при співставленні з необхідним і допустимим станом оточуючого природного середовища. Виробничий об'єкт не повинно наднормовано впливати на природне середовище, не повинно перешкоджати своїй роботі та виробничому процесу прилеглих підприємств, спричиняти через оточуюче природне середовище хід технології виробництва, спричиняти негативний вплив на здоров'я людей.

Експертиза включає оцінку впливу підприємства на природні ресурси, чинники подальшого розвитку народного господарства, природні умови, умови існування людей в межах локальної місцевості.

Предметом розгляду впливу на оточуюче навколишнє середовище є технологія конвективного сушіння зерна при використанні осцильованого способу теплової обробки зернової маси.

Дана технологія за своєю потенційною загрозою для навколишнього середовища відноситься до найбільш безпечніших та екологічно чистих видів

виробничої діяльності. Це обумовлено мінімально низькою кількістю викидів забруднюючих речовин, що утворюються внаслідок реалізації технологічного процесу сушіння зерна.

Основним джерелом забруднення для даної технології є викиди в атмосферу зважених гігроскопічних частинок або пилу, які спрямовуються в повітряний басейн з аспіраційних очищувальних систем та систем вентиляції повітря з виробничих приміщень. Відповідно до прийнятих на законодавчому рівні гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин в атмосферному повітрі кількість зважених частинок повинна коливатися в межах 0,05...0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Для запобігання перевищенню рівня концентрації пилу в повітрі необхідно постійно проводити контроль за технічним станом вентиляційного обладнання, періодично проводити моніторинг якості повітря, запровадити систему пиловідокремлюючих засобів для очищення повітряного потоку.

Негативним наслідком надмірного перевищення концентрацій пилу в повітрі є можливість виникнення вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій на виробництві.

До основних підходів щодо зменшення та локалізації пилових вибухів відносяться:

- беззаперечне дотримання дисципліни виробничого процесу, норм, положень та виробничих інструкцій;
- слідкувати за технологічним, транспортним, електротехнічним та іншим устаткування в технічно справному стані;
- зберігання продуктів та сировини в місцях, які для цього призначені;
- герметизація комунікацій і обладнання;
- ефективна робота мереж з аспірації повітря;
- постійне прибирання пилу з підлоги, стін, обладнання, будівельних конструкцій;
- суворе виконання правил проведення робіт з відкритим вогнем, у тому числі зварювальних;
- неухильне дотримання режиму куріння (тільки у відведених місцях);
- захист від статичної електрики.

Технологія ліній сушіння зерна характеризується наявністю великої кількості виробничого обладнання, яке є джерелом надмірного шуму та вібрацій. Для зниження рівня шуму до санітарно-гігієнічних норм передбачаємо використання спеціальних шумо- та вібраційнопоглинальних подушок, що встановлюємо під технологічне обладнання, а також застосування операторами індивідуальних засобів захисту - протишумних навушників.

У кінцевому випадку, технологія сушіння зерна характеризується мінімальним рівнем екологічної загрози, не призводить до негативного впливу на стан природного навколишнього середовища, є безпечним для людини та живих організмів та відповідає всім екологічним нормам та правилам, обумовлених чинним вітчизняним екологічним законодавством.

## **4.2 Охорона праці**

### **4.2.1 Аналіз наявних потенційних небезпек та об'єктів підвищеної небезпеки**

При обслуговуванні зерносушарок на працівника можуть впливати небезпечні і шкідливі фактори:

- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- рухомі механізми приводів;
- підвищена напруга електричного поля і статичної електрики;
- підвищена температура поверхні обладнання;
- можливість виникнення вибуху або пожежі.

При підвищеній запиленості повітря і наявності відкритого вогню або інших джерел підвищеної температури (нагрівання підшипників, іскріння) в приміщенні можливий вибух пилоповітряної суміші.

Обслуговуючий персонал відповідно до галузевих норм безплатної видачі спецодягу та засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) забезпечується:

- костюмом бавовняним з пилонапроникної тканини (ГОСТ 12.4.085-80, ГОСТ 12.4.086-80);

- шоломом бавовняним з пилонепроникної тканини;
- черевиками шкіряними;
- рукавицями бавовняними;
- респіратором;
- в холодну пору року - курткою на утеплювальній прокладці (ГОСТ 12.4.088-80).

Працівник, який обслуговує сушарку, зобов'язаний знати і дотримуватися:

- посадової інструкції;
- правила пожежної безпеки;
- правила особистої гігієни.

Робітник повинен:

- знати пристрій і правила експлуатації устаткування, яке обслуговує;
- знати призначення окремих вузлів і деталей;
- знати технологічний процес сушіння зерна;
- здійснювати контроль за режимом роботи обладнання, аспірації, припливно-втяжної вентиляції, теплоносія, роботу засобів автоматики і блокування;
- правильно використовувати спецодяг та ЗІЗ;
- знати прийоми надання першої допомоги при нещасних випадках;
- відповідати за роботу на своїй ділянці.

Приміщення сушарки і топки, а також устаткування, що знаходиться в цих приміщеннях, повинні міститися в чистоті і постійній справності.

Забороняється зберігання в приміщенні сушарки і топки сторонніх предметів, майна, легкозаймистих і горючих рідин, крім мастил, запас яких не повинен перевищувати добової потреби.

Прибирання приміщення сушарки повинна проводитися при її роботі не рідше двох разів на зміну. Зібрані сміття, відходи, пил повинні віддалятися з приміщення у спеціально відведене для них місце.

#### **4.2.2 Пропозиції щодо покращення умов виробничої безпеки та недопущення появи небезпечних ситуацій**

Для покращення умов виробничої безпеки та недопущення появи небезпечних ситуацій слід передбачити такі заходи з охорони праці:

1. Щодо зниження негативного впливу мікроклімату:
  - механізації виробничих процесів;
  - раціонального розміщення устаткування;
  - раціоналізації режимів праці й відпочинку, перерви.
2. Щодо боротьби з пилом:
  - раціоналізація технологічних процесів заходів;
  - зволоження переробних матеріалів;
  - підтримання чистоти приміщень та устаткування;
  - застосування індивідуальних засобів захисту.
3. Щодо боротьби з шумом (зниження його в джерелі створення):
  - використання змащувальних матеріалів (разом з безшумною роботою зменшує зношення деталей, підвищує їх довговічність);
  - організаційно-технічні заходи (своєчасний ремонт, догляд та відповідне зберігання ручного механізованого інструмента) мають профілактичне значення;
  - чергування періодів роботи і відпочинку (профілактичний засіб попередження стомлення при дії шуму).
4. Щодо запобігання появи нещасних випадків продовжувати превентивні заходи:
  - консультації з питань охорони праці;
  - роз'яснення щодо правил експлуатації нового та вже використовуваного обладнання;
  - проведення періодичних перевірок знань працівників.

Для поліпшення стану виробничої безпеки та уникнення аварій і нещасних випадків під виробничого процесу слід, окрім перелічених заходів з охорони праці, дотримуватись вимог внутрішніх організаційних документів виробничого об'єкту.

### 4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Необхідні капіталовкладення для реалізації проекту розрахуємо за формулою:

$$K_e = K_p + K_m + K_n, \quad (4.1)$$

де  $K_p$  – вартість обладнання, грн.;

$K_m$  – вартість монтажу обладнання, грн.;

$K_n$  – вартість навчання персоналу, грн..

Витрати електроенергії:

$$E_e = M_m \cdot K_{zod}, \quad (5.2)$$

де  $M_m$  – встановлена потужність, кВт;

$K_{zod}$  – кількість годин роботи за виробничий цикл.

Вартість електроенергії:

$$B_{en} = E_e \cdot B_{od}, \quad (4.2)$$

де  $B_{od}$  – вартість 1 кВт-год електроенергії для сільськогосподарських виробників, грн.

Витрати на оплату праці персоналу:

$$O_n = T_{cm} \cdot K_{zod} \cdot K_o, \quad (4.3)$$

де  $T_{cm}$  – годинна оплата праці;

$K_{zod}$  – кількість годин роботи у виробничий цикл;

$K_o$  – кількість обслуговуючого персоналу.

Амортизаційні відрахування

$$H_a = \frac{100}{C_c}, \quad (4.4)$$

де  $H_a$  – норма амортизаційних відрахувань, %;

100 – відсоток балансової вартості засобу виробництва;

$C_c$  – строк служби того чи іншого засобу виробництва (за технічним паспортом).

$$P_a = \frac{B_e \cdot H_a}{100}, \quad (4.5)$$

де  $P_a$  – річний розмір амортизаційних відрахувань, грн.;

$B_e$  – балансова вартість засобу виробництва, грн.;

$H_a$  – норма амортизаційних відрахувань, %.

Обсяг продукції після зберігання з урахуванням витрат.

$$V' = V \cdot k_{vt}, \quad (4.6)$$

де  $V$  – первісний обсяг продукції, закладеної на зберігання, т;

$k_{vt}$  – коефіцієнт втрат у процесі зберігання, %.

Ефект від застосування обладнання, т.:

$$V'_e = V'_{np} - V'_б, \quad (4.7)$$

де  $V'_{np}$  – обсяг продукції після зберігання з урахуванням втрат (проектний)

$V'_б$  – обсяг продукції після зберігання з урахуванням витрат (без застосування обладнання)

Прибуток від реалізації продукції після зберігання.

$$\Pi = B_p - C_e, \quad (4.8)$$

де  $B_p$  – виручка від реалізації, грн.;

$C_e$  – повні витрати, грн..

$$B_p = V' \cdot Ц_p, \quad (4.9)$$

де  $V'$  – обсяг продукції після зберігання, т;

$Ц_p$  – ціна реалізації продукції, грн..

Розрахунок додаткової виручки, за рахунок застосування устаткування.

$$B_{p\delta} = B_{pnp} - B_{pб}, \quad (4.10)$$

де  $B_{pnp}$  – виручка від реалізації (при застосуванні обладнання), грн.;

$B_{pб}$  – виручка від реалізації (без застосування обладнання), грн..

Розрахунок додаткового прибутку, за рахунок застосування устаткування.

$$\Pi_\delta = \Pi_{np} - \Pi_б, \quad (4.11)$$

де  $\Pi_{np}$  – прибуток від реалізації продукції після зберігання (при застосуванні обладнання), грн.;

$\Pi_б$  – прибуток від реалізації продукції після зберігання (без застосування обладнання), грн..

Додатковий прибуток від реалізації:

$$\Pi_\delta = V \cdot Ц_p \cdot k_{v\delta}, \quad (4.12)$$

де  $k_{v\delta}$  – коефіцієнт реального зменшення втрат від застосування устаткування.

Оцінка річного економічного ефекту:

$$E_{ef} = \Pi_{\partial} - (B_{en} - O_n - P_a), \quad (4.13)$$

де  $\Pi_{\partial}$  – додатковий прибуток від реалізації, грн.;

$B_{en}$  – вартість електроенергії, грн.;

$O_n$  – оплата праці, грн.;

$P_a$  – річний розмір амортизаційних відрахувань, грн..

Термін окупності:

$$T_o = \frac{K_{\phi}}{E_{ef}}, \quad (4.14)$$

де  $K_{\phi}$  – капітальні вкладення, грн.;

$E_{ef}$  – річний економічний ефект, грн..

Проектно-кошторисна оцінка розробленого проекту наведена у таблиці 4.1 за ринковими цінами на початок 2020 року.

Таблиця 4.1 – Необхідні матеріали та обладнання для впровадження розробки, з урахуванням монтажу та оплати праці робітників

Найменування	Ціна, грн.
Бетон	63360
Решітка	37500
Ангар	136800
Сушильна установка	200000
Кріплення для жорсткості	5000
Зварювальні роботи	2000
Заливка бетону	3500

Далі наведемо іншу необхідну інформацію для оцінки ефективності використання розробки (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування	Ціна
Енергоспоживання двигунів, кВтгод	19
Тарифна ставка оплати праці, грн/год	40
Базові втрати продукції без застосування обладнання, %	5
Втрати продукції із застосуванням обладнання, %	0,25
Обсяг продукції для зберігання, т	300
Зміна якості продукції у процесі зберігання без застосування обладнання	
Обсяг продукції первісного вигляду, %	60
Обсяг продукції пониженої якості, %	40
Зміна якості продукції у процесі зберігання з новим підходом до сушіння	
Обсяг продукції первісного вигляду, %	99,5
Обсяг продукції пониженої якості, %	0,5

Відповідно до запропонованої нами методики оцінки ефективності впровадження розробки наведемо загальні розрахунки.

Використовуючи формулу (4.1) та вихідні дані таблиці 4.1, оцінимо капіталовкладення.

Загальні капіталовкладення по реалізації нашого проекту складуть 448160 грн.  
( $K_e = 448160$  грн.)

Відповідно до таблиці 4.2, загальна тривалість роботи сушильної установки за 6 місяців зберігання складе 146 год.

Використовуючи формулу (4.2) оцінимо витрати спожитої електроенергії – 2747 кВт. Використовуючи формулу (4.3) оцінимо вартість спожитої електроенергії, враховуючи, що вартість 1 кВт·год на 30.04.2018 року для сільськогосподарських виробників складає 0,95 грн. ( $B_{en} = 2635$  грн.) За формулою (4.4) оцінимо витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, враховуючи загальну кількість годин роботи = 146 год та тарифну ставку оплати праці оплати праці = 40 грн., Оп = 5480 грн.

Проведемо розрахунок норми амортизаційних відрахувань за формулою (4.5), враховуючи, що запланований термін експлуатації обладнання до повного відшкодування його первісної балансової вартості – 14 років, отримаємо:  $N_a = 7,14\%$ .

Далі за формулою (4.6) розрахуємо річний розмір амортизаційних відрахувань, враховуючи, що первісна балансова вартість співпадає з початковими капіталовкладеннями для впровадження нашої розробки.

Отримаємо:

$$P_a = \frac{448160 \cdot 7,14}{100} = 32011 \text{ грн.}$$

Проведемо оцінку прибутковості устаткування, та враховуючи, що на зберігання планується закладати пшеницю, відповідно до ринкових цін за 2019-2020 рік, середня ціна реалізації 1 т продукції 2–3 класу – 3500 грн, ціна реалізації 1 т продукції 4–5 класу 2200 грн.

За формулою (4.7) розрахуємо обсяг продукції після зберігання з урахуванням втрат, за базовим варіантом –  $V'_b$  (без застосування обладнання) та за проектним (із застосуванням обладнання) –  $V'_{np}$ . Отримаємо:

$$V'_b = 300 \cdot 0,95 = 285 \text{ т;}$$

$$V'_{np} = 300 \cdot 0,9975 = 299,25 \text{ т.}$$

За формулою (4.8) розрахуємо ефект від застосування обладнання :

$$V'_e = 299,25 - 285 = 14,25 \text{ т.}$$

Використовуючи формули (4.9) – (4.14) розрахуємо додатковий прибуток, за рахунок застосування устаткування.

Спочатку оцінимо обсяг та вартість продукції, що буде реалізована за середньою ціною 1 т продукції – 3500 грн.

Відповідно за проектним варіантом :

$$V'_{np} = 299,25 \cdot 0,995 = 297,75 \text{ т;}$$

$$B'_p = 297,75 \cdot 3500 = 1042138 \text{ грн.}$$

За базовим варіантом

$$V'_{np} = 285 \cdot 0,6 = 171 \text{ т;}$$

$$B'_p = 283,475 \cdot 3500 = 598500 \text{ грн.}$$

Оцінимо обсяг та вартість продукції, що буде реалізована за середньою ціною 1 т продукції – 2200 грн.

$$V'_{np} = 299,25 \cdot 0,005 = 1,5 \text{ т};$$

$$B'_p = 1,5 \cdot 2200 = 3291 \text{ грн.}$$

За базовим варіантом

$$V'_{np} = 285 \text{ 0,4} = 114 \text{ т};$$

$$B'_p = 114 \cdot 2200 = 250800 \text{ грн.}$$

Відповідно до розрахунків, загальна виручка від реалізації проектного та базового варіантів складе :

$$B_{pnp} = 1042138 + 3291 = 1045429 \text{ грн.}$$

$$B_{pb} = 598500 + 250800 = 849300 \text{ грн.}$$

Розрахуємо додаткову виручку від реалізації, за рахунок застосування устаткування за формулою (4.11)

$$B_{pd} = 1045429 - 849300 = 196130 \text{ грн.}$$

У методичній частині забезпечення розрахунків нами було доведено, що додатковий прибуток від застосування обладнання є рівним додатковій виручці від реалізації ( $\Pi_d = B_{pd}$ ), тому:

$$\Pi_d = 196130 \text{ грн.}$$

Далі проаналізуємо величину річного економічного ефекту, використовуючи формулу (4.13).

$$E_{ef} = 196130 - (2635 + 5480 + 32011) = 156004 \text{ грн.}$$

Завершальним етапом оцінки ефективності впровадження будь-якої технологічної розробки є розрахунок терміну окупності за формулою (4.14) для його обчислення.

$$T_o = \frac{448160}{156004} = 2,87 \text{ років.}$$

На основі проведеного техніко-економічного аналізу та отриманих економічних показників можна чітко стверджувати про достатньо економічну привабливість запровадження технології сушіння зерна осцилюючим способом теплової обробки зернової маси.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

1. На основі проведеної екологічної експертизи щодо виявленню ступеня негативного впливу технології використання полімерних труб для побудови систем водо- та теплопостачання на стан природного навколишнього середовища не було встановлено фактів можливого радіоактивного, бактеріального, хімічного та інших видів забруднень

2. Основним об'єктом дослідження на предмет виявлення та упередження небезпечних ситуацій та дотримання вимог охорони праці є техніка безпека та правила поведінки при монтажу та експлуатації напірної системи технічних трубопроводів для холодної та гарячої води.

3. У ході проведення аналізу наявних потенційних небезпек при використанні полімерних труб були окреслені ймовірні причини виникнення небезпечних ситуацій та випадків. Більшість травмонебезпечних і аварійних ситуацій було піддано аналізу та надано рекомендації по їх недопущенню та профілактики.

4. На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування було встановлено, що при впровадженні запропонованої технології сушіння зерна можна досягти суттєвої річної економічної вигоди – 156004 грн при достатньо незначному терміну окупності капіталовкладень 2,87 років.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз технологій та пристрої для сушіння зерна показав перспективність використання в невеликих зерновиробних підприємствах пристроїв з контактним способом підведення теплоти до продукту, що висушується. При цьому можна висушити зерно з меншими енерговитратами при збереженні якісних показників процесу.

2. Запропоновано пристрій для сушіння зерна контактного типу. Воно включає в себе кожух, поверхня якого покрита шаром теплоізолюючого матеріалу. У середині кожуха розташований ТРО, виконаний у вигляді короба зі ступінчастою поверхнею та можливістю повідомлення йому коливань. Нагрівання робочої поверхні ТРО здійснюється за допомогою нагрівальних елементів, які розташовані в нижній її частині. Подачу зерна роблять через завантажувальний бункер, розташоване на початку першої секції ТРО, а його розвантаження через вивантажувальне вікно.

3. Аналіз отриманих аналітичних моделей процесу сушіння зерна дозволив виявити оптимальні значення основних незалежних факторів, при яких енерговитрати на одиницю маси випарованої вологи із зерна тритикале  $q_{\text{пит}}$  становлять 3,57 МДж/кг вологи: температура першої секції ТРО – 150 °С, температура другої секції ТРО 108 °С (середня  $t_{\text{п}} = 129$  °С), час сушіння зерна  $\tau_{\text{опт}} = 10$  с, швидкість руху зерна  $v_z = 0,29$  м/с. Пропускна здатність пристрою при цьому становить 221 кг/год.

4. Детальне опрацювання питань впливу розробленого технологічного процесу протравлювання зерна на стан природнього навколишнього середовища не виявило потенційний загроз в порушенні екологічних норм та стандартів. У ході проведення аналізу наявних потенційних небезпек при протравлюванні зерна були окреслені ймовірні причини виникнення небезпечних ситуацій та випадків. Більшість травмонебезпечних і аварійних ситуацій було піддано аналізу та надано рекомендації по їх недопущенню та профілактики.

5. На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування було встановлено, що при впровадженні запропонованої технології сушіння зерна можна

досягти суттєвої річної економічної вигоди – 156004 грн при достатньо незначному терміну окупності капіталовкладень 2,87 років.