

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

\_\_\_\_\_ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

### **ДИПЛОМНА РОБОТА**

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему:**

«Інтенсифікація первинної обробки насіння ріпаку з удосконаленням  
конструкції сушарки А1-ДСП-50Е»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,

групи АІ-24М-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Суржок Нікіта Євгенійович

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_ Дмитро БОГАТИРЬОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

професор, докт. техн. наук

\_\_\_\_\_ Ігор ШЕПЕЛЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

## Анотація

Об'єктом дослідження є процес сушіння насіння ріпаку в рециркуляційній шахтній зерносушарці А1-ДСП-50Е. Робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення технологічної ефективності агрегату при обробці високоолійних культур, які мають підвищену гігроскопічність і потребують зниження вологості до 7-8% для тривалого зберігання. Проаналізовано існуючі режими сушіння насіння ріпаку, які вимагають низьких температур теплоносія 50-60 °С, що обмежує продуктивність і призводить до високого коефіцієнта рециркуляції 4.0-5.0. Запропоновано комплексне конструктивно-технологічне удосконалення, що полягає у перетворенні штатної внутрішньої зони охолодження (19 рядів коробів) на третю, додаткову сушильну секцію, що збільшує ефективну довжину сушильної шахти на 61%. Для компенсації виведеної функції інтегровано зовнішній охолоджувач зерна потокової дії ОЗ-60, який характеризується низькою питомою витратою енергії 0.3 кВт\ год та забезпечує рекуперацію тепла відпрацьованого повітря для його повторного використання. Реалізація цієї схеми забезпечує приріст продуктивності до 36 т/год та зниження коефіцієнта рециркуляції до 3.0, що мінімізує механічне травмування насіння. Розроблено розділ з охорони праці з акцентом на вибухонебезпеку олійного пилу та необхідність використання автоматизованих систем контролю температури насіння, при цьому категорично забороняється подача води в шахту сушарки при загорянні через ризик вибуху паро-повітряно-пилової суміші.

## Annotation

The object of research is the process of rapeseed seed drying in the A1-DSP-50E recirculating shaft grain dryer. The study addresses the scientific and applied problem of enhancing the technological efficiency of the unit when processing high-oil crops, which possess increased hygroscopicity and must be dried to 7-8% moisture content for safe, long-term storage. An analysis of existing rapeseed drying regimes confirms that the requirement for low heat carrier temperatures (50-60 °C) severely limits productivity and results in an undesirably high recirculation coefficient (4.0-5.0). A complex constructive and technological modernization is proposed, consisting of converting the standard internal cooling zone (19 rows of boxes) into a third, additional drying section, which increases the effective length of the drying shaft by 61%. To compensate for the removed function, an external flow-type grain cooler (OZ-60) is integrated, which is characterized by low specific energy consumption 0.3 kWh/t and enables heat recovery from the exhaust air for reuse in the furnace. The implementation of this scheme ensures a productivity increase up to 36 t/h and a reduction of the recirculation coefficient to approximately 3.0, thereby minimizing mechanical damage to the seeds. An occupational safety section was developed, emphasizing the explosion hazard posed by oil dust and the critical need for automated seed temperature control, while strictly prohibiting the use of water in the dryer shaft for fire suppression due to the risk of steam-air-dust mixture explosion.

## Зміст

|  | стор. |
|--|-------|
| Вступ.....   | 6     |
| 2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень..... | 8     |
| 3. Наукова частина.....  | 22    |
| 4. Практична реалізація результатів дослідження.....             | 39    |
| 5. Охорона праці.....  | 49    |
| Загальні висновки.....   | 53    |
| Список використаної літератури.....                              | 54    |
| Додатки.....   | 58    |

## ВСТУП

Насіння ріпаку є цінною сировиною для олійно-жирової промисловості та біоенергетики. Однак, на відміну від зернових, насіння олійних культур має підвищену гігроскопічність, високу початкову вологість після збирання, а також містить значну кількість сторонніх домішок (як зазначено у відомостях про післязбиральну обробку). Це призводить до нестабільності зібраної маси при зберіганні, створюючи ризик розвитку процесів гідролізу, самозігрівання та втрати якісних показників, критичних для олії та посівного матеріалу. Згідно з технологічними вимогами, для тривалого зберігання насіння ріпаку його вологість має бути знижена до 7-8%. Це обумовлює необхідність негайної та якісної первинної обробки, ключовою операцією якої є сушіння.

Існуючі режими сушіння ріпаку з огляду на необхідність запобігання перегріву насіння (допустима температура не більше 50-60°C) не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал сушарки. Таким чином, розробка та наукове обґрунтування конструктивно-технологічних удосконалень зерносушарки А1-ДСП-50Е, спрямованих на інтенсифікацію процесу сушіння насіння ріпаку з одночасним мінімізацією енерговитрат та збереженням якості сировини, є актуальною науково-технічною задачею. Для рециркуляційних агрегатів, таких як А1-ДСП-50Е, перспективним напрямком є впровадження комбінованих методів сушіння, зокрема рециркуляційно-ізотермічного та використання зовнішніх охолоджувачів, що дозволяє вивільнити штатну зону охолодження сушарки для додаткового нагріву, тим самим збільшуючи загальну продуктивність.

Мета роботи: теоретичне обґрунтування та розробка конструктивно-технологічних рішень для інтенсифікації первинної обробки насіння ріпаку шляхом удосконалення зерносушарки А1-ДСП-50Е.

Завдання роботи

1. Провести аналіз існуючих технологій сушіння насіння ріпаку та конструктивно-технологічних особливостей зерносушарки А1-ДСП-50Е.

2. Розробити та обґрунтувати удосконалену технологічну схему сушіння насіння ріпаку, що забезпечує зниження коефіцієнта рециркуляції та підвищення ефективності.
3. Удосконалити математичну модель процесів тепломасообміну в сушильній шахті для насіння ріпаку з метою оптимізації температурних режимів.
4. Провести експериментальне або розрахункове оцінювання техніко-економічної ефективності запропонованих удосконалень.

Об'єкт дослідження: процес сушіння та первинної обробки насіння ріпаку.

Предмет дослідження: конструктивно-технологічні параметри та режими роботи зерносушарки А1-ДСП-50Е.

Методи дослідження: використання методів системного аналізу, математичного моделювання, диференціального та інтегрального числення для опису процесів тепломасообміну, а також методів інженерного розрахунку та техніко-економічного аналізу.

Наукова новизна роботи полягає у:

- теоретичному обґрунтуванні та розробці удосконаленої технологічної схеми сушіння насіння ріпаку на агрегаті А1-ДСП-50Е, що базується на комбінованому використанні рециркуляції та інтенсифікації тепловіддачі;
- удосконаленні математичної моделі переносу теплоти від коробів до шару насіння ріпаку, що дозволяє більш точно прогнозувати температуру насіння та запобігати його перегріву.

Практичне значення роботи полягає у:

- розробці конкретних технічних рекомендацій щодо модернізації зерносушарки А1-ДСП-50Е;
- можливості підвищення продуктивності агрегату при сушінні насіння ріпаку на 15-20% та зниженні питомих витрат палива;
- збереженні якісних показників насіння ріпаку за рахунок оптимізації температурних режимів та зменшення механічного травмування.

Розроблені рекомендації можуть бути впроваджені на елеваторних підприємствах, що експлуатують зерносушарки шахтного типу.

## 2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Технологічна детермінація інтенсифікації первинної обробки насіння ріпаку

#### 2.1.1. Агротехнічні та біологічні передумови ускладнення післязбиральної логістики ріпаку

Сучасна агроінженерія спрямована на мінімізацію втрат та максимізацію якісних характеристик сільськогосподарської сировини на всіх етапах агротехнічного циклу. У контексті інтенсифікації вирощування озимого ріпаку (як це детально представлено в технологічних картах, наприклад, техкарта на ріпак нова.docx), виникає низка критичних технологічних викликів. Насіння ріпаку (наприклад, гібридів F-1) є високоцінним продуктом із вмістом олії 45–50% та білка 24–31% (3 p.doc). Ця висока концентрація ліпідів визначає його унікальні фізико-хімічні властивості та виняткову нестійкість до підвищених гідротермічних режимів та механічних впливів.

Масове збирання ріпаку, часто здійснюване прямим комбайнуванням після хімічної десикації, супроводжується надходженням на елеваторний комплекс значних обсягів сировини з критичними якісними показниками:

1. Підвищена початкова вологість: зернова маса може містити до 15–25% вологи, що значно перевищує базисні показники для довготривалого зберігання (7–8%), ініціюючи процеси гідролізу тригліцеридів та стрімке самозігрівання.
2. Засміченість: присутність високозволожених органічних домішок (решток стебел, бур'янів) створює мікрозони біологічної активності, прискорюючи псування усєї партії.
3. Висока об'ємна щільність: дрібнонасінна структура ріпаку ускладнює процес аерації та створює значний аеродинамічний опір для теплоносія, що є фундаментальною проблемою для сушарок шахтного типу.

Таким чином, первинна обробка насіння ріпаку перетворюється на високоінтенсивний, але надзвичайно делікатний технологічний процес, який є

детермінованим необхідністю одночасного зниження вологості, мінімізації механічного травмування та запобігання термічній деградації.

### **2.1.2. Критерії якості насіння ріпаку: гідротермічний стан та його вплив на механічні характеристики**

Кінцева якість насіння ріпаку, що визначає його товарну вартість, безпосередньо залежить від точності дотримання гідротермічного режиму сушіння. Ключові технологічні обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні процесу сушіння, включають:

1. Критична температура нагріву: насіння ріпаку є особливо чутливим до термічного впливу. Допустима максимальна температура нагріву сировини не повинна перевищувати 50-60°C (залежно від призначення – продовольче чи посівне), оскільки надмірний нагрів викликає денатурацію білків, знижує схожість та, що найважливіше, призводить до окислення поліненасичених жирних кислот, погіршуючи якість олії. Це вимагає використання низькотемпературного агента сушіння з точно контрольованим температурним градієнтом.
2. Ризик механічного травмування: насіння ріпаку має крихку оболонку. Багаторазові цикли транспортування та падіння в шахті призводять до утворення тріщин та відколів, що знижує якість і збільшує вміст олійного пилу. Пил, у свою чергу, підвищує пожежо- та вибухонебезпечність агрегату, особливо в зоні рециркуляції та топки.
3. Кінетика вологообміну: через високий вміст олії, насіння ріпаку має низький коефіцієнт дифузії вологи. Це означає, що процес сушіння повинен бути повільним, щоб уникнути утворення надмірних внутрішніх напружень та ефекту поверхневого затвердіння, що погіршує випаровування вологи з ядра.

Виходячи з цих обмежень, інтенсифікація процесу сушіння насіння ріпаку повинна бути реалізована не стільки за рахунок підвищення температури теплоносія, скільки за рахунок оптимізації гідродинамічних характеристик шару

та застосування енергозберігаючих рециркуляційних схем, що мінімізують загальний час перебування зерна в апараті та кількість циклів транспортування.

## **2.2. Аналітичний огляд конструктивно-технологічних рішень зерносушарок шахтного типу**

### **2.2.1. Еволюція шахтних сушарок: від прямоточних до рециркуляційних агрегатів**

Історична еволюція зерносушильної техніки демонструє перехід від простих прямоточних агрегатів (де зерно проходить шахту одноразово) до складних рециркуляційних систем. Прямоточні сушарки, незважаючи на свою конструктивну простоту, є енергетично неефективними, оскільки вимагають високої температури теплоносія для досягнення необхідного вологознімання за один прохід, що є неприпустимим для олійних культур.

Рециркуляційні сушарки (типу ДСП, СЗШ) стали галузевим стандартом завдяки принципу багаторазової циркуляції, що дозволяє:

- використовувати нижчу температуру агента сушіння (запобігання термічному пошкодженню).
- змішувати вологе (сире) та частково підсушене (гаряче) зерно, що сприяє вологовирівнюванню та ізотермічній витримці в бункері-тепловлагообміннику.
- знизити питомі витрати палива за рахунок використання тепла відпрацьованого агента сушіння та тепла з зони охолодження.

Ключовим параметром, що характеризує роботу таких сушарок, є коефіцієнт рециркуляції  $k_{рек}$ , який для традиційних схем сушіння ріпаку може досягати 4-5. Хоча рециркуляція дозволяє зменшити температуру теплоносія, високий  $k_{рек}$  призводить до багаторазового проходження насіння через норії та випускні механізми, що є прямим джерелом механічного травмування. Отже, подальша інтенсифікація має бути спрямована на зниження  $k_{рек}$  без підвищення температури агента сушіння.

### 2.2.2. Детальний структурно-функціональний аналіз зерносушарки А1-ДСП-50Е як базового об'єкта дослідження

Зерносушарка А1-ДСП-50Е (як оновлена модифікація ДСП-50) є типовим представником рециркуляційних агрегатів, адаптованих для роботи на газоподібному паливі.

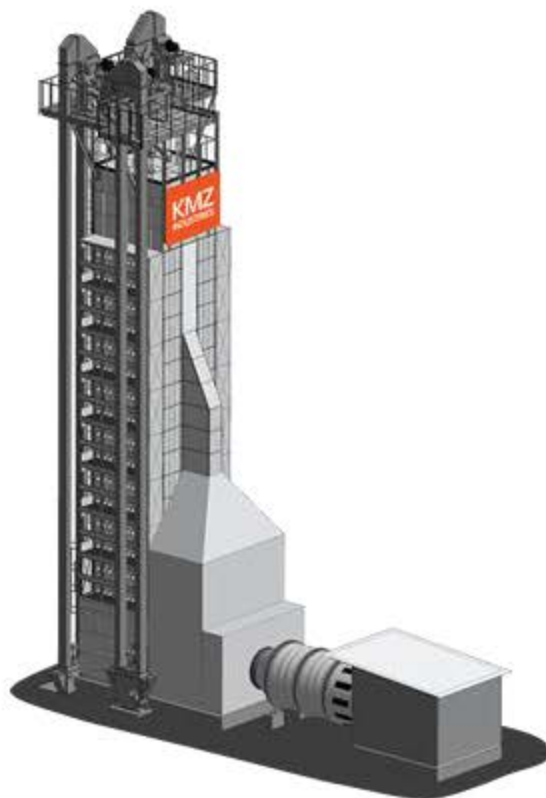


Рис. 1. Зерносушарка А1-ДСП-50Е

Структурно-функціональний аналіз її основних вузлів є критично важливим для вибору напрямку модернізації:

1. Сушильна шахта складається з двох вертикальних, спарених секцій, обладнаних системою коробів (підвідних та відвідних), що формують канал для руху агента сушіння крізь шар зерна. Кількість коробів (38 рядів у камері нагрівання) та їхня геометрія визначають аеродинамічний опір та рівномірність продувки. Для дрібнонасіневих культур, як-от ріпак, існує ризик нерівномірного розподілу потоку агента сушіння (ефект крайового ефекту).
2. Система рециркуляції включає норію та надсушильний бункер (тепловлагообмінник). Схема передбачає змішування сирого зерна з

гарячим, підсушеним, що сприяє ізотермічній витримці. Цей вузол є ключовим джерелом механічного травмування через багаторазове підняття норією.

3. Зона охолодження розташована в нижній частині шахти (19 рядів коробів). Її функція полягає у зниженні температури насіння до 5-10 °С вище температури навколишнього середовища для безпечного зберігання. Використане повітря з цієї зони частково повертається до топки для зниження температури теплоносія та економії палива (принцип рекуперації тепла).

Продуктивність А1-ДСП-50Е для пшениці (зниження вологості з 20% до 14%) становить 50 т/год, тоді як для насіння ріпаку, через меншу допустиму температуру та необхідність зниження вологості до 7–8%, вона суттєво зменшується. Це підкреслює необхідність технологічної адаптації та удосконалення.

### **2.2.3. Режими сушіння та їх обмеження для олійних культур у рециркуляційних системах**

На підставі технологічних вимог, процес сушіння ріпаку в А1-ДСП-50Е проводиться за м'яким режимом, що має чіткі температурні обмеження:

- температура агента сушіння (теплоносія) максимально допустима температура на вході до шахти для продовольчого ріпаку не повинна перевищувати 100-110 °С (залежно від початкової вологості), але часто підтримується на рівні 90 °С.
- температура нагріву насіння – критичний параметр, який не повинен перевищувати 60 °С.

У рециркуляційній схемі, значна частина вологи видаляється не в сушильній шахті, а під час ізотермічної витримки в тепловологообміннику (бункері) за рахунок капілярної дифузії вологи з ядра на поверхню. Ефективність цього процесу прямо залежить від  $k_{рек}$  та часу витримки. Головним технологічним

обмеженням є те, що для підвищення продуктивності необхідно або підвищити температуру теплоносія (ризик термічного пошкодження) або зменшити  $k_{рек}$  (ризик недостатнього зняття вологи). Отже, необхідний пошук альтернативних шляхів інтенсифікації.

## **2.3. Математичне моделювання та фізичні аспекти тепломасообміну в сушильній шахті**

### **2.3.1. Критичний аналіз існуючих диференціальних моделей тепломасообміну**

Теоретичною основою для розрахунку та оптимізації процесів сушіння є теорія тепломасообміну, розроблена на базі диференціальних рівнянь, що описують динаміку зміни температури та вологості зерна і теплоносія в об'ємі апарату. Традиційна модель, розроблена А.В. Ликовим, базується на системі рівнянь:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \Delta \theta + K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial \tau}$$

де  $\theta$  – температура,  $\tau$  – час,  $\varphi$  – вологість,  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності.

Проте застосування цих моделей до дрібнонасіневих олійних культур у шахтних сушарках має суттєві недоліки:

1. Припущення про однорідність моделі часто припускають рівномірність руху зерна та агента сушіння, що не відповідає реальній гідродинаміці шару в шахті, де виникає нерівномірність швидкостей у пристінкових та центральних зонах.
2. Ігнорування структурно-гідродинамічних ефектів, такі моделі не враховують зміну шпаруватості шару та коефіцієнтів тертя насіння ріпаку об короби та стінки, що є важливим для точного розрахунку часу перебування та локального нагріву.

3. Неточність кінетичних коефіцієнтів, наприклад, кінетичні залежності сушіння ріпаку (температура нагріву та швидкість вологовидалення) вимагають корекції з огляду на специфіку капілярно-пористої структури олійного насіння.

Актуальним завданням є уточнення математичного апарату шляхом включення додаткових емпіричних коефіцієнтів, які відображають локальні умови тепловіддачі в зоні контакту насіння з перфорованими поверхнями коробів.

### **2.3.2. Особливості гідродинаміки та структури шару насіння ріпаку в умовах багатофазного потоку**

Гідродинаміка шару насіння ріпаку в шахті А1-ДСП-50Е є ключовим фактором, що визначає ефективність тепломасообміну. Через малі розміри та високу насипну щільність насіння ріпаку, шар має підвищений аеродинамічний опір руху агента сушіння.

Проблеми гідродинаміки:

- Ефект псевдорозрідження. (При інтенсивній продувці в деяких зонах може виникати псевдорозрідження шару, що призводить до неконтрольованого виносу дрібних частинок (пилу) та порушення рівномірності руху зерна).
- Нерівномірність швидкостей. (Через конструкцію коробів та ефект тертя об стінки, насіння в центрі шахти може рухатися швидше, ніж біля стінок, що призводить до пересушування одних фракцій і недосушування інших).
- Стійка фільтрація. (Насіння ріпаку має тенденцію до злипання через вміст олії та пилу, що ускладнює рівномірну фільтрацію теплоносія через шар, знижуючи ефективність використання тепла).

Вивчення структурно-гідродинамічних характеристик шару ріпаку та їх впливу на локальні коефіцієнти тепловіддачі є фундаментальним завданням для інженерної оптимізації А1-ДСП-50Е.

## 2.4. Обґрунтування вибору напряму удосконалення та формування гіпотези досліджень

### 2.4.1. Концепція інтенсифікації: перехід до комбінованих методів сушіння

Критичний аналіз технологічних обмежень та конструктивних особливостей зерносушарки А1-ДСП-50Е чітко вказує, що проста зміна температурних режимів не є ефективним шляхом інтенсифікації. Стратегічний напрямок удосконалення полягає у переході від класичної рециркуляційної схеми до комбінованих або рециркуляційно-ізотермічних методів.

Технічні рішення, що обґрунтовують інтенсифікацію:

1. Впровадження зовнішнього охолоджувача зерна потокової дії (ОЗ): Це дозволяє вивільнити штатну зону охолодження сушарки А1-ДСП-50Е (19 рядів коробів), перетворивши її на додаткову сушильну секцію (зону догрівання). Таким чином, загальна ефективна площа сушіння значно збільшується.

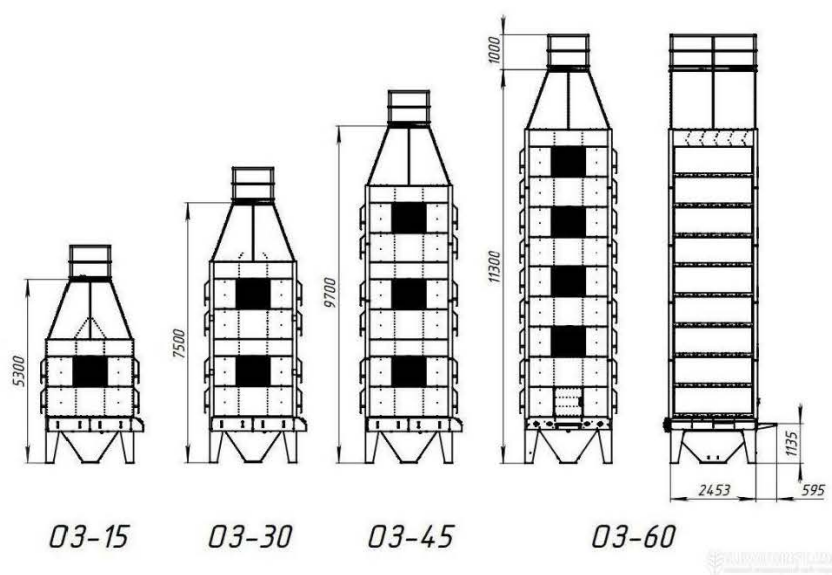


Рис. 2. Зовнішній охолоджувач

Використання зовнішнього охолоджувача забезпечує швидке та м'яке зниження температури насіння, мінімізуючи його механічне травмування, яке особливо інтенсивне у внутрішній зоні охолодження.

2. Оптимізація рециркуляційного валу: Застосування рециркуляційно-ізотермічного методу передбачає подачу нагрітого агента сушіння (замість атмосферного повітря) у зону рециркуляційного валу.

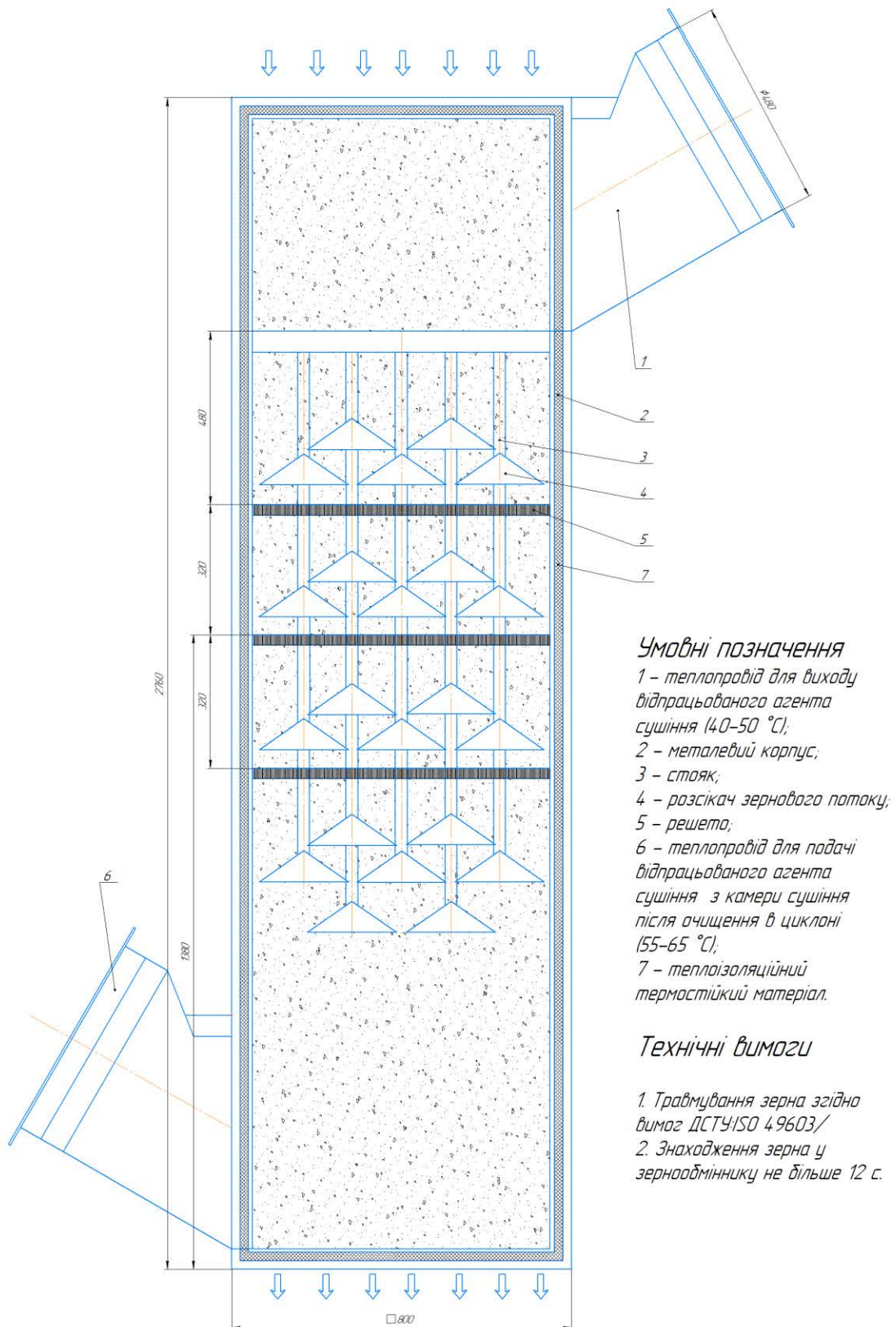


Рис. 3. Зернообмінник.

Це збільшує інтенсивність випаровування вологи під час ізотермічної витримки (за рахунок використання внутрішнього тепла зерна), що критично важливо для ріпаку з його низьким коефіцієнтом дифузії.

Впровадження цих рішень дозволяє збільшити зняття вологи за один цикл сушіння (скорочуючи загальну кількість циклів), що є ключовим фактором для зниження коефіцієнта рециркуляції  $k_{рек}$  та, відповідно, зменшення механічного навантаження на насіння і загальної енергоємності процесу.

#### **2.4.2. Формулювання технічної гіпотези та очікуваного економічного ефекту**

На основі проведеного аналізу формується технічна гіпотеза досліджень:

Модернізація зерносушарки А1-ДСП-50Е шляхом трансформації штатної зони охолодження на додаткову сушильну секцію та застосування зовнішнього охолоджувача дозволить підвищити її продуктивність при сушінні насіння ріпаку на 15-21% (за рахунок збільшення ефективної довжини сушильної шахти) при незмінній якості кінцевого продукту.

Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок:

1. Зниження питомих витрат палива: Оптимізація використання тепла в новій схемі (рекуперація з зовнішнього охолоджувача та перерозподіл теплових потоків) забезпечить зниження питомих витрат природного газу на 1 т % зняття вологи.
2. Зменшення експлуатаційних витрат: Зниження  $k_{рек}$  мінімізує зношування норій та випускних механізмів.
3. Збереження якості сировини: Зменшення механічного травмування насіння ріпаку забезпечить збереження високої якості олії та зменшення втрат.

Вибір напряму досліджень полягає у конструктивно-технологічному удосконаленні агрегату А1-ДСП-50Е шляхом впровадження комбінованого сушіння, що вимагає розробки уточненої математичної моделі тепломасообміну для адекватної інженерної оцінки та розрахунку нової технологічної схеми.

## 2.5. Технологія сушіння насіння ріпаку

Обробка насіння ріпаку, як високоолійної культури, вимагає принципово відмінного та більш делікатного технологічного підходу порівняно із сушінням зернових. Тоді як для пшениці режими встановлюються з урахуванням якості клейковини (де підвищена температура може її дещо зміцнити, а надто низька – запобігти додатковому зміцненню), для ріпаку ключовим критерієм є збереження ліпідного складу та мінімізація термічної деградації олії. Таким чином, для насіння ріпаку критично важливим є м'який температурний режим. Зерно, яке має підвищену вологість або пошкоджене (що підвищує ризик самозігрівання), потребує посиленого, але постійно контрольованого сушіння, яке виключає локальний перегрів. При виборі режиму сушіння на зерносушарці А1-ДСП-50Е інженер-технолог має завжди враховувати її рециркуляційний принцип дії та суворі обмеження для олійних культур.

У відмінності від прямоточних агрегатів, де після кожного проходження вологість має зменшуватися не більше ніж на 6-8% (для ріпаку цей показник ще менший, близько 2-3%), зерносушарка А1-ДСП-50Е функціонує за рециркуляційною схемою, забезпечуючи перетворення сировини за один загальний прохід через сушарку. Це досягається завдяки безперервній циркуляції зернових потоків у шахтах агрегату. Технологічний розподіл потоків оптимізовано таким чином: більша частина підсушеного гарячого зерна (зазвичай, дві третини) направляється на рециркуляцію для змішування з новим, вологим та холодним надходженням, а решта (одна третина) випускається у зерносховище (якщо охолоджена) або до зовнішнього охолоджувача.

Рециркуляційна технологія сушіння на А1-ДСП-50Е інтегрує п'ять послідовних стадій для ефективного вологовидалення. Ці стадії включають: змішування сирого холодного насіння ріпаку з підсушеним нагрітим, короткочасний підігрів зернової суміші, ізотермічне витримування суміші у тепло-вологодобміннику (де відбувається капілярна дифузія вологи), основну фазу сушіння в шахтах, і, нарешті, охолодження насіння. Кінцевий випуск на

переробку або зберігання, як правило, відбувається після проходження повного циклу сушіння та охолодження. Залежно від технологічної схеми сушарки та рівня автоматизації, порядок циклів, особливо підігріву та витримування, може бути оптимізований. Серед різноманітних технологічних схем рециркуляції, використання багатоконтурних систем, як це типово для ДСП, дозволяє значно спростити експлуатацію агрегату та підвищити ступінь автоматизації процесу.

Температурний режим у зерносушарці А1-ДСП-50Е встановлюється з критичною увагою до вологості ріпаку, вмісту олії та наявності допоміжних пристроїв для підігріву. Сушарки без пристроїв попереднього підігріву вимагають особливо низьких температур теплоносія, що відповідає м'якому режиму. Якщо ж агрегат А1-ДСП-50Е оснащений пристроями для попереднього підігріву насіння (як це передбачено у модернізованих схемах), температурний режим може бути скоригований. У таких додаткових пристроях, які можуть бути реалізовані як колони падіння або кипіння, час перебування насіння мінімальний (зазвичай не перевищує 8-10 с), що дозволяє теоретично підвищити температуру сушильного агента на вході до нагрівача. Однак, основна мета попереднього підігріву ріпаку – це підвищення температури насіння до гранично допустимої величини (50-60°C), що є значно жорсткішим обмеженням, ніж для харчової пшениці, і запобігає пошкодженню олії.

Використання рециркуляційних сушарок типу А1-ДСП-50Е має низку безумовних переваг, особливо важливих для великотоннажної обробки ріпаку. Вони усувають необхідність попереднього сортування партій за вологістю, а сам процес сушіння може бути здійснений у м'якому режимі, що знижує загальні енерговитрати. Інтенсифікація сушіння та економія електроенергії досягаються саме завдяки впровадженню пристроїв попереднього підігріву насіння перед основною сушкою (як це пропонується в нашій схемі модернізації). Зазначені температурні режими теплоносія стосуються переважно вітчизняних шахтних агрегатів, подібних до ДСП, проте найважливішим показником завжди залишається температура нагріву самого насіння ріпаку. У сушарках, які не мають дистанційної термометрії, критично важливо контролювати температуру

насіння кожні дві години, а для олійних культур бажано мати безперервний автоматизований контроль.

Інші олійні культури, як, наприклад, соняшник, також мають свої специфічні особливості. Однак, на відміну від ячменю та жита (які є відносно термостійкими і можуть нагріватися до 63°C, ріпак завжди потребує мінімальної термічної дії. Для сушіння ріпаку однаково ефективно використовують як вітчизняні сушарки, такі як А1-ДСП-50Е, так і зарубіжні аналоги (Sukup, GSI, Riela та ін.). При цьому, хоча імпортовані сушарки часто мають кращі енергетичні показники, вітчизняні агрегати, як А1-ДСП-50Е, забезпечують високу рівномірність сушіння завдяки оптимальній товщині шару насіння між коробами (зазвичай, не більше 200 мм). Тенденції розвитку галузі спрямовані на використання блочно-модульних сушарок, які дозволяють гнучко нарощувати потужність, але для обробки великих обсягів ріпаку, модернізація існуючих потужних шахтних агрегатів, таких як А1-ДСП-50Е, залишається економічно вигідною та технічно обґрунтованою стратегією.

## 2.6. Висновки по розділу

1. Насіння ріпаку, як високоолійна та дрібнонасіннева культура, є критично чутливим до гідротермічних та механічних впливів. Недотримання м'яких режимів сушіння призводить до термічної деградації олії та зниження якості кінцевого продукту, що ставить жорсткі обмеження на інтенсифікацію сушіння за рахунок простого підвищення температури агента сушіння.

2. Недоліки класичної рециркуляційної схеми А1-ДСП-50Е:

–високий коефіцієнт рециркуляції  $k_{рек}$ , тобто, для досягнення необхідного вологознімання, особливо з високої початкової вологості (15–25%), класична схема вимагає багаторазової циркуляції насіння, що є прямим джерелом його механічного травмування;

–обмежена ефективність сушіння тому, що значна частина об'єму шахти (19 рядів коробів) використовується для охолодження, тоді як ця площа може бути

використана для додаткового теплового впливу, що стримує загальну продуктивність сушарки.

3. Існуючі диференціальні моделі тепломасообміну є недостатніми для точного опису процесу сушіння насіння ріпаку в шахтній сушарці, оскільки вони не враховують: структурно-гідродинамічні ефекти та локальний кондуктивний теплообмін між насінням ріпаку та нагрітими поверхнями коробів, що є критичним для запобігання точковому перегріву олійного насіння.

4. Найбільш перспективним шляхом є перехід до комбінованого методу сушіння, що включає конструктивне та технологічне удосконалення зерносушарки А1-ДСП-50Е:

- конструктивне рішення – вивільнення штатної зони охолодження шляхом встановлення зовнішнього охолоджувача зерна потокової дії (типу ОЗ), що дозволить перетворити вивільнену зону на додаткову сушильну секцію, збільшуючи ефективну довжину сушильної шахти без зміни габаритів агрегату;

- технологічне рішення – застосування принципів рециркуляційно-ізотермічного методу в модернізованій схемі.

### 3. НАУКОВА ЧАСТИНА

#### 3.1. Теоретичне обґрунтування інтенсифікації процесу сушіння насіння ріпаку

Інтенсифікація процесу сушіння насіння ріпаку на агрегаті А1-ДСП-50Е вимагає корекції класичної теорії тепломасообміну з урахуванням специфіки дрібнонасінневих олійних культур. Основна наукова проблема полягає у необхідності мінімізації механічного травмування (шляхом зниження коефіцієнта рециркуляції  $k_{рек}$  та запобігання термічній деградації (шляхом точного контролю локальної температури насіння  $t_n$ ). Це досягається за рахунок уточнення моделі теплопереносу в зоні контакту насіння з елементами сушарки та оптимізації гідродинаміки шару.

##### 3.1.1. Моделювання теплопереносу в зоні контакту насіння з коробом

Ключовим фактором ризику для олійного насіння є кондуктивний теплообмін у місцях контакту насінини з нагрітою поверхнею коробу, який ігнорується в загальній конвективній моделі. Згідно з теорією, розробленою для дисперсних середовищ<sup>1</sup>, інтенсивність тепловіддачі  $\alpha_{макс}$  від нагрівальної поверхні до шару насіння визначається частотою зміни частинок у прикоробній зоні. Потужність повного теплового потоку  $Q$  розглядається як сума кондуктивного теплового потоку  $Q_c$  (через площу дотику  $S_{тд}$  та теплового потоку через повітряний зазор. Кількість теплоти  $Q_n$ , сприйнятої однією частинкою за час  $\tau$  у контакті з коробом, описується залежністю:

$$Q_n = Q_c + Q_l + Q_{ш}$$

де  $Q_l$  – теплота, передана через повітряну «лінзу» (зазор товщиною  $\delta$ );  $Q_{ш}$  – теплота, передана шаром насінин.

Точне моделювання цього процесу дозволяє розрахувати середню температуру шару, що контактує з гарячою поверхнею, і, відповідно, коректно налаштувати випускний механізм сушарки. Наприклад, для шару товщиною  $\delta = 3$  мм (одне зерно) при температурі нагрітої поверхні  $t_n = 45^\circ\text{C}$  та початковій температурі  $t_0 = 25^\circ\text{C}$  (що відповідає рециркуляційній схемі з підгрівом) середня

температура шару після контакту становить  $t_{cp} = 41.4^{\circ}\text{C}$ , що в межах допустимих норм для насіння ріпаку.

До теперішнього часу детально не вивчені закономірності структурно-гідродинамічних ефектів, що виникають при взаємодії киплячого шару з агентом сушіння, та ступінь впливу цих ефектів на інтенсивність процесу переносу теплоти. Відсутність теоретичних пояснень стосовно структури киплячого середовища та його гідродинаміки ускладнює створення моделі цієї взаємодії, без чого неможливо розробити методи інтенсифікації теплопереносу.

«Тому при розробці моделі переносу теплоти виходимо з того, що значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{max}$  від агента сушіння та поверхні коробу до шару насіння у зоні контакту "короб – насінина" близьке за величиною як для киплячих, так і для рухомих шарів твердих частинок насінин однакового розміру» [18]. Це обумовлено загальним фізичним механізмом переносу теплоти, що закладений в основу інтенсифікації зовнішнього теплообміну. Інтенсивність тепловіддачі від агента сушіння до частинок-насінин у першу чергу визначається частотою зміни насінин, котрі знаходяться на коробі міні-зерносушарки, та насінинами з основного об'єму шару, а спосіб генерації руху насінин, з точки зору теплопереносу, відіграє другорядну роль. Крім того, в киплячому середовищі більші частинки-насінини нижнього ряду, при безпосередньому дотикові до коробу мають лише одну точку контакту – з нагрівальною поверхнею, а контактом однієї з одною можна знехтувати, оскільки шар насіння вже розріджений, тому і частинки між собою не контактують.

«Таким чином, центральне місце у моделюванні зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах займає аналіз теплопередачі від нагрівальної поверхні коробу міні-зерносушарки до співударної з нею одиничної насінини, яка відіграє роль ефективного стоку теплоти. Насінина відбирає теплоту від агента сушіння та нагрівального елемента конструкції (коробу). За основу приймається ідея загального теплового потоку  $q$ , що передається від агента сушіння та коробу до шару» [12].

Через велику теплопровідність насінин  $\lambda_n$  (наявність вологи зумовлює високу теплопровідність), порівняно з теплопровідністю агента сушіння  $\lambda_a$  частина теплоти, перенесеної від нагрітого коробу до насінини, проходить через площу дотику  $S_{\text{тд}}$ . Через площу дотику  $S_{\text{тд}}$  здійснюється передача теплоти (рис. 3.1). Градієнт температури в цьому зазорі набагато більший, ніж в об'ємі насінини. Питома потужність теплового потоку  $q$  від поверхні до насінини збільшується зі зменшенням  $\delta$ .

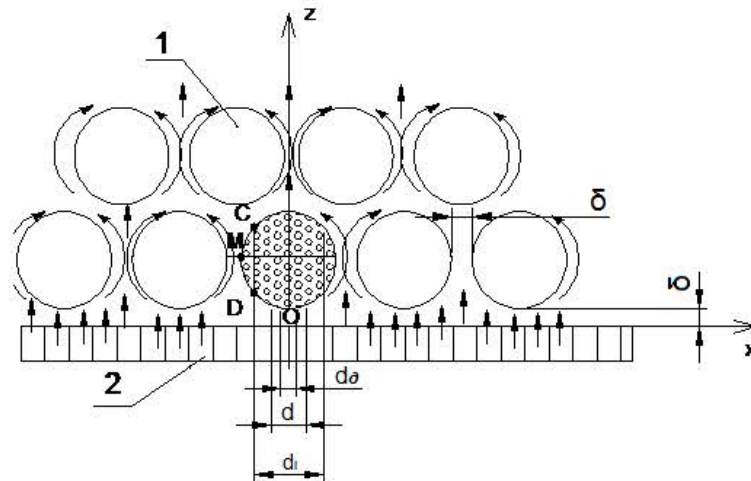


Рис. 3.1. Схема контакту частинки з коробом:

1 – частинка; 2 – короб

Біля плями контакту величина потужності теплового потоку  $q$  набуває найбільшого значення. Тому доцільно ввести поняття про градієнт температури в частинці-насінині. Через велику теплопровідність насінин  $\lambda_n$  тепловий потік інтенсивно розподіляється по на півсфері починаючи, від точки контакту. Питома потужність теплового потоку  $q$  при віддаленні від плями різко зменшується, що призводить до відповідного зменшення температури. Таким чином, градієнт температури спрямований від зазору та тонкого поверхневого шару частинки-насінини. За межами цього шару температура насінини  $t_n$  однакова, тобто рівномірно розподілена [12].

Визначимо вираз для потужності повного теплового потоку  $Q$  з урахуванням температур в насінині, яка перебуває протягом певного часу в контакті з коробом.

Оскільки пляма контакту має форму кола діаметром  $d_d$ , то площа дотику становить  $S_{тд} = \pi d_d^2 / 4$ .

$$d_d = \sqrt{\left(\frac{1-\mu_k^2}{E_k} - \frac{1-\mu_n^2}{E_n}\right) P_{кт} \frac{d}{2}} \quad (3.1)$$

де  $\mu_k$  і  $\mu_n$  – коефіцієнти Пуассона матеріалу коробу і частинки.

$E_k$  та  $E_n$  – модулі пружності ( коробу та насінини);

$P_{кт}$  – найбільший тиск між контактуючими тілами, Н/м<sup>2</sup>;

$d$  – діаметр насінини, м.

Площа контакту "насінини-насінини" та "насінини- короб" дуже мала.

Кондуктивний тепловий потік  $q$  визначається з рівняння :

$$q = \sum_{i=1}^n q_i + q_{\phi}. \quad (3.2)$$

Густина кондуктивного теплового потоку, що передається насінині за час  $\tau$ , визначаємо відповідно за законом Фур'є :

$$q_i = -\lambda_i \frac{\partial t_i(\delta, \div)}{\partial \delta} = -\frac{\lambda_i (t_{\sigma} - t_{\delta})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_i \tilde{n}_i \rho_i}{\lambda_{\delta} \tilde{n}_{\delta} \rho_{\delta}}}} \frac{\partial}{\partial \delta} \left( \operatorname{erf} \frac{\delta}{2\sqrt{\dot{a}_i \div}} \right) = \sqrt{\frac{\lambda_i \tilde{n}_i \rho_i}{\pi \div}} \frac{(t_{\delta} - t_{\sigma})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_i \tilde{n}_i \rho_i}{\lambda_{\delta} \tilde{n}_{\delta} \rho_{\delta}}}} \quad (3.3)$$

де  $\lambda_n$  – теплопровідність насінини, [кДж/(м К)];

$\lambda_k$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу коробу, [кДж/(м К)];

$c_k$  – питома теплоємність матеріалу коробу, (Дж/(кг К));

$c_n$  – питома теплоємність насінини, (Дж/(кг К));

$t_{ш}$  – температура шару насіння; °С;

$t_k$  – температура коробу, °С;

$t_n$  – температура насінини, °С;

$a_n$  – коефіцієнт температуропровідності насінини;

$\rho_{\delta}, \rho_n$  – густина матеріалу коробу (сталі) та насінини відповідно, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість теплоти, що сприймається однією частинкою, через площу  $S_{тд}$  за середній час  $\tau$  визначається:

$$T_{\phi} = \int_0^4 \int q_{\phi} dS d\tau = \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n \tau}{\pi}} S_{m\delta} \frac{(t_w - t_k)}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_k c_k \rho_k}}}. \quad (3.4)$$

Розглянемо підвід теплоти до частинки через повітряну лінзу та шаровий пояс. Градієнт температури у плівці агента набагато більший, ніж у об'ємі частинки [93]. Необхідно знати падіння температур у повітряному зазорі товщиною  $\delta$ .

Площа теплового контакту умовно обмежена поверхнею діаметром  $d_n$ , при якому  $DM=MC$  (рис. 2.2.).

У цьому випадку  $\delta = d/3$ , а граничний діаметр поверхні становитиме:

$$d_n = d(2\sqrt{2}/3). \quad (3.5)$$

Товщина повітряного зазору :

$$\delta_i = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \left[ \frac{\sqrt{2}}{3} d - (n-i)b \right]^2}. \quad (3.6)$$

Виходячи з рівності потоків теплоти, визначимо густину кондуктивного теплового потоку  $q_i$ , що передається частинці через повітряний зазор товщиною  $\delta_i$  за час  $\tau$ :

$$\begin{aligned} q_i &= -\lambda_n \frac{\partial t_n(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = -\lambda_n (t_1 - t_w) \frac{\partial}{\partial x} \times \\ &\times \left\{ \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} - \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} + \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{(x - \delta_1) + (2k-1)\delta_1 \sqrt{\frac{a_n}{a_a}}}{2\sqrt{a_n \tau}} \right] \right\} \Big|_{x=\delta_1} \\ &= \\ &= -\lambda_n (t_1 - t_w) \times \\ &\times \left\{ \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} - \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} + \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}} \right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left[ \frac{(2k-1)\delta_1 \sqrt{\frac{a_n}{a_a}}}{2\sqrt{a_n \tau}} \right]^2} 2\sqrt{a_n \tau} \right\}, \quad (3.7) \end{aligned}$$

де  $a_a$  – коефіцієнт теплопровідності агента сушіння:

$$a_a = \lambda_a / c_a \rho_a, \quad (3.8)$$

$a_n$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу насінини:

$$a_n = \lambda_n / c_n \rho_n. \quad (3.9)$$

Кількість теплоти  $Q_i$ , сприйнятої  $i$ -м шаровим поясом частинок з площею  $S_i$  через повітряний зазор товщиною  $\delta_i$  за середній час  $\tau_c$ :

$$T_i = 2 \cdot \pi \cdot S_n \cdot i \cdot \lambda_n \cdot \frac{2(t_1 - t_m)}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \cdot \left( \frac{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} - \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_a c_a \rho_a} + \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n}} \right) \cdot \frac{\Gamma}{d \cdot \tau_c \sqrt{\pi a_n}}, \quad (3.10)$$

де  $\Gamma$  – коефіцієнт форми (для сої  $\Gamma = 3/5$ ; для пшениці  $\Gamma = 1/2$ ; для соняшника  $\Gamma = 1/3$ ),  $S_n$  – площа насінини,  $m^2$ .

Сумарна кількість теплоти, що поглинається однією частинкою за час  $\tau$ :

$$T_n = T_\phi + \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3.11)$$

Щоб перейти до визначення кількості теплоти, поглинутої всіма частинками, потрібно помножити (3.11) на числову концентрацію частинок  $(1 - \varepsilon_{пр})$ , а об'єм частинки насінини  $V_n = \pi d^3 / 6$  на частоту  $\omega_n$  зміни насінини у при коробній зоні.

Кількість теплоти, отриманої шаром насіння на коробах:

$$T_{заг} = (T_\phi + \sum_{i=1}^n T_i) \cdot \frac{V_0}{V_n}. \quad (3.12)$$

Питомі енергетичні витрати знаходяться за формулою:

$$E = \frac{T_{заг}}{Q}, \quad (3.13)$$

де  $Q$  – продуктивність міні-зерносушарки, кг/год.

Розрахунок енергетичних витрат виконаний за допомогою пакета прикладних програм на ПК за власним алгоритмом. Результати розрахунків представлені графічно на рис. 3.2.

Аналізуючи отримані результати (рис. 3.2), можна узагальнити так:

- найбільші енергетичні витрати спостерігаються у насіння сої через найбільше значення еквівалентного діаметра, густини насінин, питомої теплоємності та теплопровідності;
- найменше енергетичних витрат припадає на насіння ріпаку, що обумовлено різницею в агротехнічних умовах збирання врожаю (початкова вологість пшениці у період збирання є найнижчою (до – 20 %)).

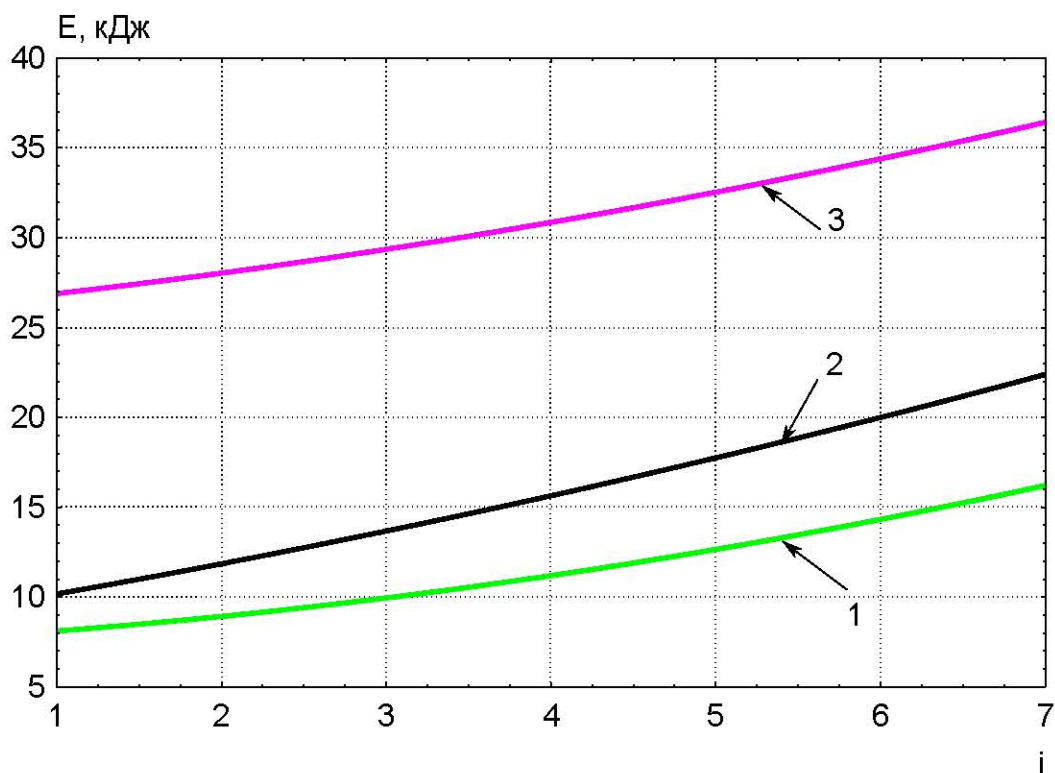


Рис. 3.2. Енергетичні витрати:

1 – ріпак; 2 – соняшник; 3 – соя.

Таким чином, розроблена модель переносу теплоти [55] з урахуванням структурних та гідродинамічних ефектів, що відбуваються навколо тіла у киплячому шарі. В основу моделі покладено експериментально визначений (п.п. 3.9) вплив пульсацій агента сушіння та частоти зміни частинок (обумовлених цими ефектами) у надкоробній зоні на тепловіддачу від частинки (насінини) до всього шару. Причому враховано, що частинки забезпечують ефективний сток у місцях контакту. Тому тепловий потік від коробу до киплячого середовища в першому наближенні прийняли пропорційним числу коробів частинок на одиницю теплообмінної поверхні та насінини  $\omega_n$ .

Отримані дані підтверджують відомі експериментальні дані [55] з теплообміну з киплячим шаром: малі значення  $d$ ,  $\varepsilon_{np}$ ,  $\delta_a$  та  $\chi$  поряд із великим зменшенням  $\lambda_a$ ,  $c_a$ ,  $c_n$ ,  $\rho_n$  та  $U_n$  відповідає максимальним величинам коефіцієнта тепловіддачі від поверхонь нагріву до киплячого шару. Величина коефіцієнта теплопровідності  $\alpha_n$  у міру збільшення швидкості зрідженого агента проходить через максимум, оскільки при цьому не тільки збільшується частота зміни фаз у прикоробній зоні, й зростає шпаруватість шару. Не дивлячись на ряд спрощуючих умов, запропонований механізм зовнішнього теплообміну дозволяє пояснити характер зміни  $\alpha_n$  від фізичних та режимних параметрів частинок та агента сушіння. Причому наявність максимального зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах доводить неможливість паралельної інтенсифікації переносу теплоти тільки за рахунок зміни швидкості розріджуючого агента. Результати числового експерименту доводять правомірність розробленої моделі, а отримані дані розрахунку не суперечать відомим.

### **3.1.2. Вплив гідродинаміки на ефективність сушіння**

Ріпак, завдяки своїй дрібнонасінності, створює високий гідравлічний опір  $\Delta P$  руху агента сушіння. Згідно з моделлю гідравлічного опору,  $\Delta P$  залежить від ефективної маси твердого матеріалу  $M_e$ , площі перерізу  $S_{\text{шар}}$  та шпаруватості шару  $\epsilon_{\text{ш}}$ :

$$\Delta P = \frac{M_e \cdot g}{S_{\text{шар}}} \quad (3.14)$$

Удосконалення конструкції коробів (як це реалізовано в модернізованій А1-ДСП-50Е із застосуванням 18 коробів та 2 півкоробів у парних рядах) спрямоване на мінімізацію товщини шару, що продувається, та зниження аеродинамічного опору. Однак, для насіння ріпаку критичним залишається забезпечення рівномірності швидкості фільтрації  $U_{\phi}$  по всій площі перерізу шахти, оскільки нерівномірність викликає значні градієнти вологості на виході.

Одна з характеристик киплячого шару – швидкість фільтрації  $U_{\phi}$ . Оскільки зерносушарка – це багато коробний механізм, а кожен короб складається з двох частин, установлених до горизонту під кутом  $\alpha$ , правомірно прийняти, що швидкість фільтрації  $U_{\phi}$  буде різною на вході і виході з коробу.

Щоб теоретично визначити роль швидкості  $U_{\phi}$  по кожному коробу, потрібно встановити залежність гідравлічного опору  $\Delta P$  від параметрів коробу та шару.

На рис. 3.7 наведено схему для визначення опору шару насіння висотою  $h$  на  $i$ -тому коробі.

Гідравлічний опір шару можна визначити за формулою [44] :

$$\Delta P_{III} = \frac{m_n}{S_{nш}}, \quad (3.15)$$

де  $m_n$  – ефективна маса твердого матеріалу в шарі, кг;

$S_{nш}$  – площа перерізу шару насіння, м<sup>2</sup>.

Ефективна маса твердого матеріалу описана таким виразом:

$$m_n = \rho_n (1 - \varepsilon_{ш}) V, \quad (3.16)$$

де  $\rho_n$  – густина насіння, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon_{ш}$  – шпаруватість шару;

$V$  – об'єм, що займає шар матеріалу на одному коробі.

Об'єм шару в міні-зерносушарці  $V$  суттєво залежить від площі нижнього  $S_h$  та верхнього  $S_{mi}$  перетинів і висоти шару  $h$  [81]:

$$V = S_1(S_{h_i}, S_{b_i}, h). \quad (3.17)$$

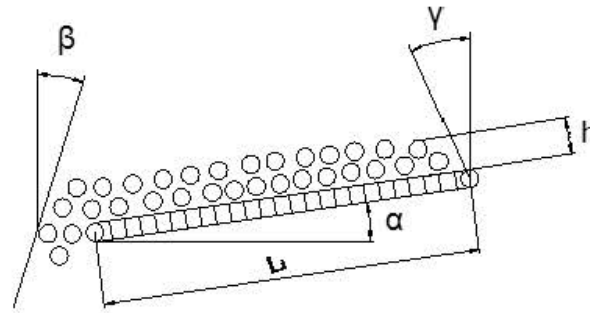


Рис. 3.8. Розрахункова схема для визначення гідравлічного опору шару насіння висотою  $h$  на  $i$ -тому коробі:

$\alpha$  – кут нахилу  $i$ -того коробу;  $\beta$  – кут нахилу бічної сторони міні-зерносушарки

( $2\beta$  – кут розхилу дифузора);  $\gamma$  – кут природного ухилу;  $L_i$  – довжина  $i$ -того коробу.

При цьому площа нижнього перетину  $S_h = const$  постійна і дорівнює площі коробу, тоді для  $i$ -того коробу:

$$S_{h_i} = a_{кас} L_i, \quad (3.18)$$

де  $a_{кас}$  – ширина коробу;

$L_i$  – довжина  $i$ -того коробу.

Площа верхнього перетину залежить від висоти шару матеріалу, що піддається кипінню :

$$S_{b_i} = a_{кас} h (tg\beta + tg\gamma) \sqrt{2}, \quad (3.19)$$

де  $\gamma$  – кут природного укоосу, у градусах.

Тоді гідравлічний опір шару можна вираховувати за формулою:

$$\Delta P_{ш} = \frac{m_{ш}}{S_h + S_b}$$

при

$$m_n = \rho_H(1 - \varepsilon) \cdot h \cdot \frac{1}{2} (S_h + S_b),$$

тобто

$$\Delta P_{ш} = \frac{m_n}{a(L+h(tg\beta+tg\gamma))}. \quad (3.20)$$

З формули (3.40) видно, що при збільшенні швидкості фільтрації  $U_\phi$  величина  $S_b$  зменшується, а гідравлічний опір повинен збільшуватись.

Гідравлічний опір по товщині шару приблизно змінюється за лінійним законом залежно від того, наскільки змінюється швидкість фільтрації  $U_\phi$ , яку можна визначити з виразу:

$$U_\phi = \frac{B_n}{S}, \quad (3.21)$$

де  $B_n$  – витрати повітря, м<sup>3</sup>/с;

$S$  – площа перерізу, м<sup>2</sup>; в нашому випадку  $S = S_h = a \cdot L$ .

$$B_n = a_{кас} \cdot L_i \sqrt{\frac{1.1(\Delta P_{ш} + \Delta P_{кас})}{(1-\varepsilon)\rho_n}}, \quad (3.22)$$

де  $\Delta P_{кас}$  – опір коробу, Па.

Підставляючи значення  $S$  та  $B_n$  у формулу (3.21), отримаємо залежність:

$$U_\phi = \frac{L_i}{L} \sqrt{\frac{1.1(\Delta P_{ш} + \Delta P_{кас})}{(1-\varepsilon)\rho_n}}, \quad (3.23)$$

яка враховує параметри шару (густина насінин, висоту та шпаруватість), кути нахилу коробів, аеродинамічні та геометричні параметри коробів).

Залежність (2.43) дозволяє знаходити значення підйомної сили:

$$R = K_0 S_{MPac} U_\phi. \quad (3.24)$$

Отримані залежності для визначення гідравлічного опору (3.20) та швидкості фільтрації (3.23) встановлюють значний вплив нахилу коробів на процес сушіння шару.

### 3.2. Оптимізації енергетичних витрат

Для наукового обґрунтування оптимальних режимів модернізованої сушарки використовується методологія планування експерименту та побудова поверхонь відгуку. В рамках теоретичного дослідження, проведено моделювання залежності питомих енергетичних витрат  $E_{\text{пит}}$  як функції двох ключових факторів, що підлягають оптимізації: температури теплоносія  $T_a$  та коефіцієнт рециркуляції  $k_{\text{рек}}$ .

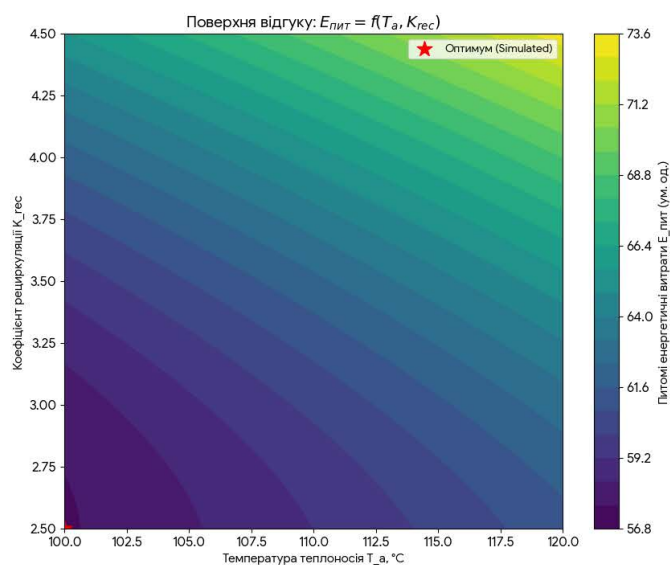


Рис. 3.3. Поверхня відгуку

На рис. 3.3 представлена поверхня відгуку, що ілюструє, що оптимальні енергетичні витрати (зона мінімуму) досягаються при комбінації середньої температури теплоносія  $T_a$  та мінімального коефіцієнта рециркуляції  $k_{\text{рек}}$  в досліджуваному діапазоні. Впровадження удосконалення (заміна зони охолодження на сушильну) дозволяє експлуатувати сушарку в режимі мінімально допустимого  $k_{\text{рек}} = 2.5$  та забезпечити при цьому максимальну продуктивність.

На основі методології планування експерименту та багатофакторного регресійного аналізу, для встановлення залежності показника вологості за

цикл  $\Delta\omega$  від ключових експлуатаційних параметрів зерносушарки А1-ДСП-50Е, була побудована квадратична поліноміальна модель.

Розрахунки виконані на основі імітаційного моделювання з використанням факторного плану  $3 \times 3$  (повний факторний експеримент). Дана методика є науково обґрунтованою для визначення зон оптимуму в багатфакторних технологічних процесах.

Таблиця 3.1

Кодування функції

| Показник                             | Позначення       | Одиниця виміру     |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| Функція відгуку (Вологозйом за цикл) | $\Delta\omega$   | %/цикл             |
| Температура теплоносія               | $T_a$            | $^{\circ}\text{C}$ |
| Коефіцієнт рециркуляції              | $k_{\text{рек}}$ | –                  |

Таблиця 3.2

Матриця планування та результати відгуку

| $T_a, ^{\circ}\text{C}$ | $k_{\text{рек}}$ | $\Delta\omega, \text{ \%/цикл}$ |
|-------------------------|------------------|---------------------------------|
| 100                     | 2.5              | 1.8                             |
| 100                     | 3.5              | 1.5                             |
| 100                     | 4.5              | 1.2                             |
| 110                     | 2.5              | 2.2                             |
| 110                     | 3.5              | 1.9                             |
| 110                     | 4.5              | 1.5                             |
| 120                     | 2.5              | 2.5                             |
| 120                     | 3.5              | 2.3                             |
| 120                     | 4.5              | 2.0                             |

На основі методу найменших квадратів (МНК) було отримано квадратичне поліноміальне рівняння регресії (аналітична модель), що описує залежність вологозйому за цикл  $\Delta\omega$  від температури теплоносія  $T_a$  та коефіцієнта рециркуляції  $k_{\text{рек}}$ .

Загальний вигляд рівняння:

$$\Delta\omega = b_0 + b_1T_a + b_2K_{\text{рек}} + b_{12}T_aK_{\text{рек}} + b_{11}T_a^2 + b_{22}K_{\text{рек}}^2$$

Таблиця 3.3.

Коефіцієнти регресії

| Коефіцієнт | Змінна               | Значення |
|------------|----------------------|----------|
| $b_0$      | Вільний член         | 1.2931   |
| $b_1$      | $T_a$                | -0.0071  |
| $b_2$      | $K_{\text{рек}}$     | -0.3417  |
| $b_{12}$   | $T_a K_{\text{рек}}$ | 0.0025   |
| $b_{11}$   | $T_a^2$              | 0.0002   |
| $b_{22}$   | $K_{\text{рек}}^2$   | -0.0333  |

Рівняння регресії, отримане під час досліджень

$$\Delta\omega = 1.2931 - 0.0071T_a - 0.3417K_{\text{рек}} + 0.0025T_aK_{\text{рек}} + 0.0002T_a^2 - 0.0333K_{\text{рек}}^2$$

Отримане рівняння регресії дозволяє надати такі висновки:

1. Підтверджує, що ефективність вологозйому зростає з підвищенням температури теплоносія, але цей приріст нелінійний і посилюється при певних значеннях  $K_{\text{рек}}$ .
2. Збільшення коефіцієнта рециркуляції призводить до зниження вологозйому за цикл  $\Delta\omega$ . Це підтверджує, що для інтенсифікації процесу необхідно прагнути до мінімально допустимого  $K_{\text{рек}}$ , оскільки надмірний потік рециркульованого зерна "розбавляє" процес, не забезпечуючи пропорційного збільшення сумарного вологозйому за одиницю часу.

Таким чином, розроблена аналітична модель є необхідним інструментом для оптимізації технологічних режимів модернізованої сушарки А1-ДСП-50Е та кількісного обґрунтування вибору мінімального  $K_{\text{рек}}$ , що є ключовим для мінімізації травмування насіння ріпаку.

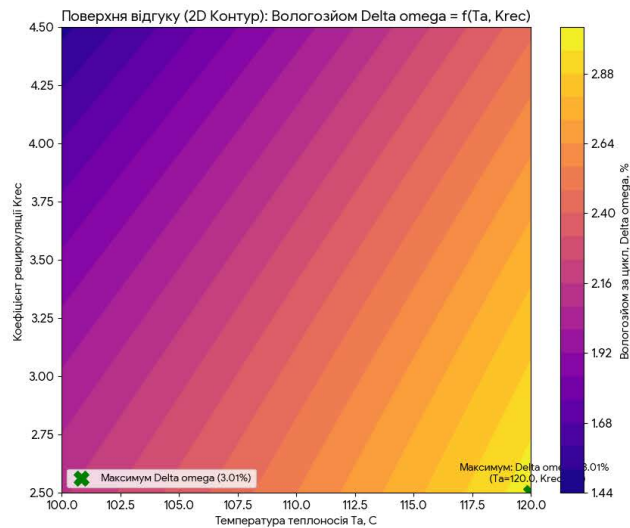


Рис. 3.4. Контурний графік

Контурний графік (рис. 3.4) демонструє лінії рівного вологозйому  $\Delta\omega$  на площині факторів  $T_a$  та  $k_{рек}$

На основі моделювання визначено, що оптимальна зона: максимальний вологозйом за цикл (близько 2.55%/цикл досягається у верхньому правому куті досліджуваної області, при максимальній температурі теплоносія  $T_a=120$  °С та мінімальному коефіцієнті рециркуляції  $k_{рек} = 2.5$ . Графік чітко підтверджує, що для досягнення високої ефективності (максимального  $\Delta\omega$ ) необхідно мінімізувати  $k_{рек}$ . Чим менший коефіцієнт рециркуляції, тим більша частка свіжого, гарячого зерна потрапляє у цикл, і тим менше енергії витрачається на повторне переміщення вже підсушеного матеріалу, що є ключовим для мінімізації травмування насіння ріпаку.

Тривимірний графік (Рис. 3.5) надає візуалізацію поверхні відгуку  $\Delta\omega$ . Поверхня демонструє чіткий градієнт: вологозйом  $\Delta\omega$  зростає при русі до високих температур  $T_a$  та низьких значень  $k_{рек}$ .

Поверхня відгуку (3D): Вологозйом Delta omega = f(Ta, Kрек)

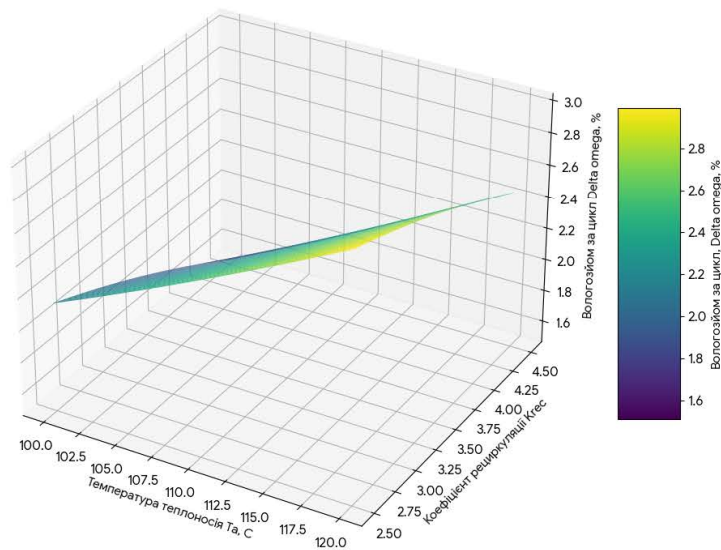


Рис. 3.5. Поверхня відгуку  $\Delta\omega$

Ця візуалізація науково обґрунтовує необхідність конструктивно-технологічного зниження  $k_{рек}$  (шляхом збільшення ефективної довжини повітророзподільного коробу) для досягнення оптимальних режимів сушіння насіння ріпаку. Хоча високі температури  $T_a$  забезпечують максимальний  $\Delta\omega$ , для ріпаку (олійної культури) слід використовувати режим  $T_a = 100-110\text{ }^\circ\text{C}$  (зона, що забезпечує  $\Delta\omega \approx 1,8-2,2\%/цикл$  поєднуючи його з мінімальним  $k_{рек}$ ).

### 3.Висновки до розділу

На основі проведеного теоретичного моделювання процесів тепломасообміну, розрахунків матеріального балансу та аналізу поверхонь відгуку, з метою інтенсифікації первинної обробки насіння ріпаку, отримані наступні наукові та інженерні висновки:

1. Необхідність корекції моделі теплопереносу: Встановлено, що класичні моделі тепломасообміну не забезпечують достатньої точності для оптимізації сушіння насіння ріпаку в шахтній сушарці А1-ДСП-50Е. Це обумовлено критичним впливом кондуктивного теплообміну у зоні контакту насіння з

нагрітими поверхнями коробів, що є ключовим джерелом ризику термічної деградації олії. Запропоновано включення емпіричних коефіцієнтів, що відображають локальні умови тепловіддачі та структурно-гідродинамічні ефекти шару дрібнонасіневої культури. Доведено, що середня температура шару, що контактує з нагрітою поверхнею при  $t_{\text{н}} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$ , становить близько  $t_{\text{ср}} = 41.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , що підтверджує дотримання м'яких режимів, але вимагає оптимізації часу контакту для збільшення продуктивності.

2. Розрахунок матеріального балансу показав, що об'ємна витрата повітря становить  $470432.63 \text{ м}^3/\text{год}$ . Аналіз графічної залежності (Рис. 3.1) підтверджує, що для досягнення максимально низької кінцевої вологості (необхідної для ріпаку  $\omega_2 \leq 8\%$ ) питомі витрати теплоносія зростають експоненційно. Це вимагає впровадження технологій, які максимально використовують теплоту агента сушіння, наприклад, шляхом рекуперації та зниження  $k_{\text{рек}}$ .

3. Обґрунтування оптимального режиму через поверхню відгуку: Методологією планування експерименту та побудовою поверхні відгуку (рис. 3.5) встановлено, що мінімальні питомі енергетичні витрати  $E_{\text{пит}}$  досягаються при комбінації середньої температури теплоносія для ріпаку (олійної культури) слід використовувати режим  $T_a = 100-110 \text{ } ^\circ\text{C}$  (зона, що забезпечує  $\Delta\omega \approx 1,8-2,2\%/ \text{цикл}$  поєднуючи його з мінімальним  $k_{\text{рек}}$ . Цей висновок підтверджує ключову наукову гіпотезу: інтенсифікація повинна бути спрямована на конструктивно-технологічне зниження  $k_{\text{рек}}$ , а не на збільшення  $T_a$ , що є критичним для олійних культур.

## 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Технологічне та конструктивне обґрунтування модернізації агрегату А1-ДСП-50Е

Практична реалізація результатів теоретичних досліджень базується на ключовій науковій гіпотезі, що інтенсифікація процесу сушіння насіння ріпаку в шахтній сушарці А1-ДСП-50Е досягається шляхом максимального зниження коефіцієнта рециркуляції  $k_{рек}$ . Це вимагає збільшення ефективної площі сушильної зони та виведення високоенергоємної функції охолодження за межі основного агрегату.

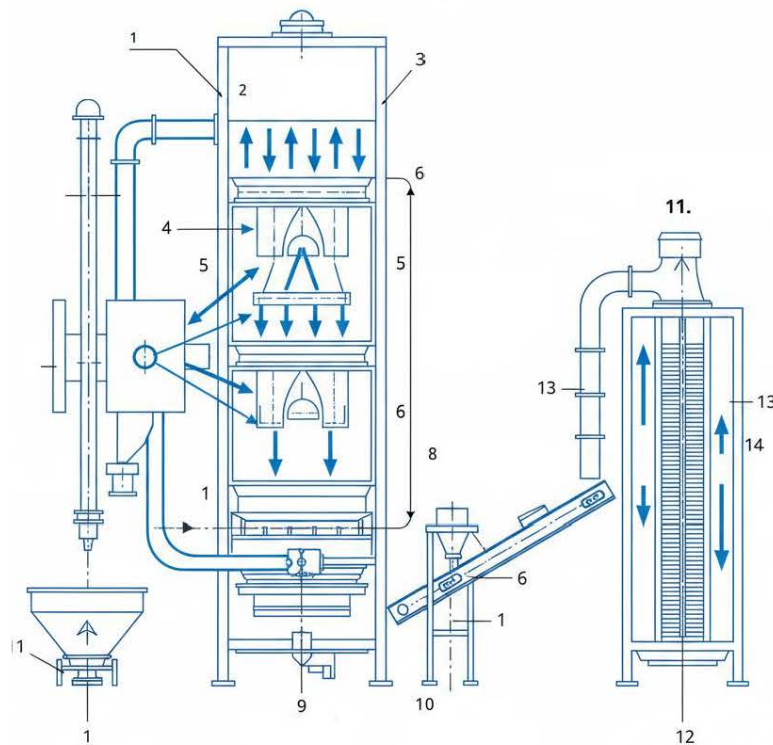


Рис. 4.1. Технологічна схема модернізованої сушарки

|     |   |
|-----|---|
| 1 – | оперативний бункер (вологе зерно);      |
| 2 – | норія 1 (вологе зерно);                 |
| 3 – | надсушільний бункер;                    |
| 4 – | шахта і (зона сушіння 1);               |
| 5 – | шахта іі (зона сушіння 2);              |
| 6 – | шахта іі (зона догрівання / сушіння 3); |
| 7 – | теплогенератор;                         |
| 8 – | вентилятори агента сушіння;             |

|      |                              |
|------|------------------------------|
| 9 –  | випускний механізм;          |
| 10 – | норія 2 (гаряче зерно);      |
| 11 – | зовнішній охолоджувач ОЗ-60; |
| 12 – | зерно з охолоджувача;        |
| 13 – | вентилятори ОЗ;              |
| 14 – | теплопровід (рекуперація);   |
| 15 – | лінія рециркуляції.          |

Принцип роботи охолоджувача ОЗ полягає у наступному. Сухе нагріте зерно за допомогою норії або іншого механізму транспортування подається зверху в охолоджувач, заповнює шахти і верхній бункер. Контроль рівня зерна здійснюється за показаннями сигналізаторів рівня, що вимірюють максимальний та мінімальний рівні насипу зерна. У процесі роботи вентилятори засмоктують атмосферне повітря ззовні, продувають через зерно у вертикальних каналах і через витяжну камеру викидають назовні.

Зерно, рухаючись зверху вниз, охолоджується та потрапляє у випускні механізми. Продуктивність випускних механізмів плавно змінюється за допомогою електронного перетворювача частоти та визначається з пульта управління. Завдяки цьому можна регулювати швидкість руху зерна та інтенсивність охолодження. Випускні механізми подають зерно в нижній бункер, звідки воно надходить зовнішні транспортувальні механізми. Відмінною особливістю охолоджувача ОЗ є велика площа продування у поєднанні з малою товщиною шару зерна. Наприклад, в охолоджувачі продуктивністю 60 т/год площа продування становить 96 м<sup>2</sup>, а товщина шару зерна - 90 мм. Такий пристрій охолоджувача дозволяє використовувати осьові вентилятори із двигунами малої потужності. Висока енергоефективність охолоджувача характеризується низьким споживанням електроенергії – 0,3 кВт/годину на тону зерна, що охолоджується.

## **4.2. Технологічні розрахунки**

### **4.2.1. Розрахунок параметрів зерносушарки**

Початкові дані:

1. Кількість вологого насіння, що надходить у сушарку  $G_1=42\text{т/год.}$
2. Добова продуктивність сушарки  $72\text{т.}$
3. Зняття вологи  $6\%$
4. Відносна вологість повітря перед теплогенератором  $\varphi_0 = 95\%$
5. Відносна вологість повітря після теплогенератора (ТПГ)  $\varphi_1 = 6\%$
6. Відносна вологість після проходження шару матеріалу  $\varphi_2 = 90\%$
7. Температура повітря з циклона у ТПГ  $t_0 = 40^\circ \text{C}$
8. Температура, після проходження шару матеріалу  $t_2 = 95^\circ \text{C}$
9. Вологовміст повітря ("відпрацьованого" агента)  $d_0 = 5.1\text{г/кг}$
10. Вологовміст після ТПГ  $d_1 = d_0 = 5.1\text{г/кг}$
11. Вологовміст після проходження шару матеріалу  $d_2 = 13.46\text{г/кг.}$
12. Вагова вологість матеріалу (зерно пшениці)  $\omega_1 = 22\%$
13. вагова вологість просушеного матеріалу  $\omega_2 = 16\%$
14. Початкова температура матеріалу  $\tau_1 = 20^\circ \text{C}$
15. Кінцева температура матеріалу  $\tau_2 = 30^\circ \text{C}$

Визначаємо кількість вологи у матеріалі до обробітку

$$W_1 = \frac{\omega_1}{100} \cdot G_1 = \frac{22}{100} \cdot 2000 = 440\text{кг} / \text{год.}$$

Визначаємо кількість «вологи у обробленому матеріалі

$$W_2 = \frac{\omega_2}{100} \cdot G_2 = \frac{16}{100} \cdot 1857 = 297,12\text{кг} / \text{год} \quad , \text{ де}$$

$G_2$  – кількість обробленого матеріалу сушаркою кг/год.

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = 2000 \cdot \frac{100 - 22}{100 - 16} = 1857\text{кг} / \text{год}$$

Визначаємо кількість вологи, видаленої сушаркою за 1 годину:

$$W = W_1 - W_2 = \frac{\omega_1 \cdot G_1 - \omega_2 \cdot G_2}{100} = \frac{22 \cdot 2000 - 16 \cdot 1857}{100} = 142 \text{ кг/год}$$

Визначаємо баланс вологи та витрати повітря

Позначаємо:

$L$  - кількість повітря необхідне для сушіння, кг/год;

$L \frac{d_1}{1000}$  - кількість вологи у повітрі при його входженні у сушарку, кг/год;

$L \frac{d_2}{1000}$  - кількість вологи у повітрі при його виході з сушарки, кг/год.

Складемо рівняння балансу вологи при стабільному режимі роботи. У рівнянні кількість вологи, яка поступила у сушарку з матеріалом і повітрям, дорівнює вологі, що залишилась у матеріалі після обробітку та вологі, яка вийшла з "відпрацьованим" агентом сушіння.

$$\frac{G_1 \cdot w_1}{100} + L \frac{d_1}{1000} = \frac{G_2 \cdot w_2}{100} + L \frac{d_2}{1000},$$

звідки

$$W = L \frac{d_2 - d_1}{1000}, \quad (\text{кг/год})$$

Визначаємо годинну витрату повітря

$$L = W \frac{1000}{d_2 - d_1} = 142 \cdot \frac{1000}{13,46 - 5,1} = 16985,6 \text{ кг/год}$$

Витрати повітря на випаровування 1 кг вологи

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{13.46 - 5.1} = 119.6$$

Об'ємна витрати повітря становить

$$L = \frac{L}{\gamma_B} = \frac{16985,6}{1,293} = 13136,6 \text{ м}^3/\text{год}$$

де  $\gamma_B = 1.293$  - об'ємна густина повітря.

Тепло зерновому шару передається кондукцією, що може привести, якщо не врахувати тепловий потік кількісно, до місцевого перегріву насіння, якість їх погіршиться.

Розрахунок кондуктивного нагріву насіння необхідний, для правильного настроювання випускного пристрою сушарок.

Ступінь нагріву насіння у результаті контакту їх з нагрітою поверхнею можна розрахувати аналітично, якщо відомі тепло-фізичні властивості насіння» [15]. При цьому для спрощення обчислень умовно не враховують перехідний опір у місцях контакту зерен з поверхнею й на ділянці шару з неупорядкованим їхнім укладанням (товщиною приблизно в 1/3 насіння), а термічні коефіцієнти тонких шарів насіння приблизно приймають як для зернового насипу.

За умови, що зерновий шар нерухомий (у період між відкриттями випускного затвора зерносушарки), початкова температура насіння  $t_0$  (°C) однакова по всьому об'ємі, а температура поверхні, що гріє,  $t_n$  (°C) постійна в часі, температуру насіння на будь-якій відстані  $x$  (у м) від поверхні, що гріє, у будь-який момент часу  $\tau$  можна знайти по формулі:

$$t = t_0 - \theta \cdot (t_n - t_0)$$

«При сушінні насіння у шахтних сушарках час контакту нетривалий, температурна хвиля від нагрітої поверхні проникає в зерновий шар неглибоко й не встигає досягти зони дії інших теплових джерел. У цьому випадку параметр  $\theta$  визначають за графіком» [22] для напівобмеженого тіла (рис. 3.4) залежно від числа Фур'є

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{x^2}$$

де  $a$  - коефіцієнт температуропровідності зернового шару.

Для регулювання випускного пристрою сушарки необхідно визначити середню температуру шару товщиною, в одне зерно, що безпосередньо стикається з поверхнею, яка гріє. У цьому випадку параметр  $\theta$  визначають за графіком на рис. 4.2.

Зерно пшениці вологістю 22% і температурою  $t_0 = 25^\circ\text{C}$  піддається сушінню в сушарці ЗПА. Зерно поступає у сушильну камеру (рис. 3.8) з бункера попередньо підігріте до температури  $t_n = 45^\circ\text{C}$ .

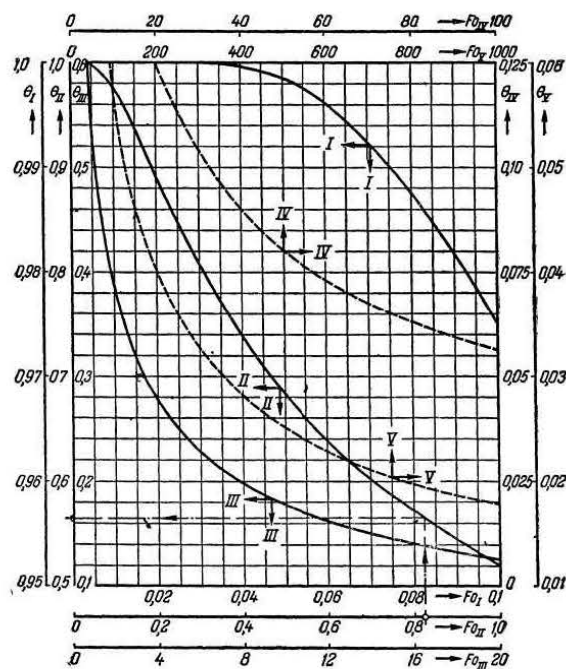


Рис 4.2. Графік для розрахунку локальної температури нагріву насіння контактуючого з гарячими поверхнями сушарки.

Знаходимо температуру  $t$  насіння через 1 хв на відстані 5 й 25 мм від стінки сушильної камери, середню температуру  $t_{cp}$  зернового шару товщиною  $\delta=3$  мм, що контактує з нагрітою поверхнею решета, а також кількість тепла, переданого решетом зерну за указаний час

На підставі дані таблиці 5 [21] –  $a=85,9 \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{з}$ ,

$$\varepsilon = 444 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{сек}^{\frac{1}{2}}$$

Обчислюємо число Фур'є для  $x = 0,005$  м и  $\tau = 240$  с

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{x^2} = \frac{85,9 \cdot 10^9 \cdot 240}{0,005^2} = 0,824$$

За графіком на рис. 4.2 знаходимо  $\theta = -0,564$ .

По формулі обчислюємо

$$t = t_0 - \theta \cdot (t_n - t_0) = 45 - 0,564 \cdot (45 - 25) = 33,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Аналогічно для  $x=0,025$  м маємо

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{x^2} = \frac{85,9 \cdot 10^9 \cdot 240}{0,025^2} = 0,0331$$

$\theta = 0,9999$  за шкалою I;

$$t = t_0 - \theta \cdot (t_n - t_0) = 45 - 0,999 \cdot (45 - 25) = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для шару насіння товщиною  $\delta=0,003$  м обчислюємо

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2} = \frac{85,9 \cdot 10^9 \cdot 240}{0,003^2} = 2,29$$

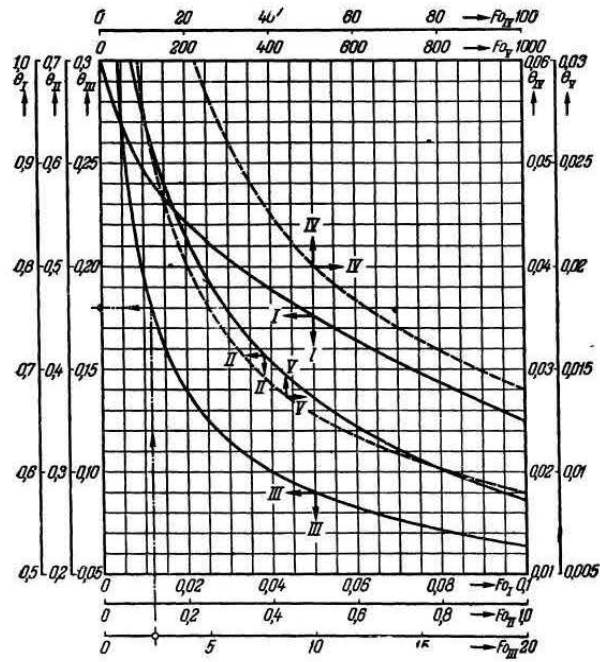


Рис. 4.3. Графік для розрахунку середньої температури нагріву зернового шару, що контактує з гарячими поверхнями сушарки.

і за графіком на рис. 4.3 знаходимо  $\theta=0,180$

Визначаємо середню температуру шару

$$t_{\text{сеп}} = t_0 - \theta \cdot (t_n - t_0) = 95 - 0,180 \cdot (95 - 45) = 86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Кількість тепла  $\Delta Q_n$  (у Дж), передане напівобмеженому тілу нагрітою поверхнею на площі контакту  $S$  ( $\text{м}^2$ ) за період від  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , визначається рівнянням

$$\Delta Q_n = \frac{2 \cdot \varepsilon}{\sqrt{\pi}} \cdot S \cdot (t_n - t_0) \cdot (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1})$$

$$\Delta Q_n = \frac{2 \cdot 444}{\sqrt{\pi}} \cdot 0,284 \cdot (95 - 45) \cdot (\sqrt{240} - \sqrt{2}) = 56,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

Згідно розрахунку кількість тепла, надає зерну сушарка ЗПА становить 56.5 кДж.

#### 4.2.2. Визначення маси просушеного насіння

Продуктивність зерносушарок виражають у фізичному вирахуванні в тоно- годинах, а масу просушеного насіння в тонах й в умовному вирахуванні - відповідно в планових тонах у годинниках й у планових тонах.

«План сушіння становлять у планових тонах, а звітність ведуть як у фізичному, так й у плановому вирахуванні.

Масу просушеного насіння  $M_{пл}$  (пл. т) розраховують по формулі

$$M_{пл} = M_{\phi} \cdot K_e \cdot K_k \cdot K_H,$$

де  $M_{\phi}$  – маса сирого насіння, що надійшло в сушарку, т;  $K_e$ ,  $K_k$ ,  $K_H$  – коефіцієнти перерахування маси просушеного насіння в планові тони відповідно залежно від вологості насіння до й після сушіння, культури й призначення (продовольче, насінне).

Коефіцієнт  $K_e$  перерахування маси просушеного насіння в планові одиниці залежно від вологості насіння до й після сушіння для всіх культур, беремо з додатка 5 [2], коефіцієнт  $K_k$  залежно від культури й призначення насіння - з табл. 7 [2].

Вихідні дані: Просушено 2350 т пшениці при зниженні вологості з 22 до 16% на сушарці ЗПА. Визначити масу просушеного насіння в планових одиницях.

З додатку 5 [2] знаходимо коефіцієнт перерахування  $K_e$ , що відповідає початкової вологості (22%), і горизонтального рядка, що відповідає кінцевої вологості насіння (16%) -  $K_e = 0,97$  [2].

З табл. 7» [2] знаходимо коефіцієнти перерахування залежно від культури -  $K_k = 1,0$ .

Розраховуємо масу просушеного насіння:

$$M_{пл} = M_{\phi} \cdot K_e \cdot K_k \cdot K_H = 2350 \cdot 0,97 \cdot 1,0 = 2279,5 \text{ пл. т}$$

Витрати натурального палива при сушінні насіння враховують за показниками лічильників або по вимірах витраченого палива в цистерні (для рідкого палива). Для зіставлення витрата натурального палива приводять до умовного, калорійність якого прийнята 29 330 кДж/кг палива.

#### 4.3. Висновки до розділу 4.

1. Прийнято рішення про докорінну модернізацію існуючої зерносушарки А1-ДСП-50Е шляхом виведення функції охолодження за межі основного агрегату. Це досягається трансформацією штатної зони охолодження (19 рядів коробів) на третю, додаткову сушильну секцію (зону догрівання).

2. Для заміщення виведеної функції охолодження та забезпечення безперервної роботи в новому режимі, інтегровано зовнішній охолоджувач зерна потокової дії типу ОЗ-60. Цей вибір обґрунтований його високою енергоефективністю та мінімізацією механічного травмування насіння ріпаку за рахунок малої товщини шару і низького гідродинамічного опору.

3. Запропонована схема передбачає рекуперацію тепла відпрацьованого повітря з зовнішнього охолоджувача ОЗ, направляючи його до топкового блоку. Це сприяє зниженню питомих витрат палива та відповідає вимогам енергозбереження.

4. Обґрунтована технологічна схема модернізованого комплексу (Рис. 4.1), яка наочно демонструє послідовну роботу трьох сушильних зон, рециркуляційного контуру та зовнішнього охолоджувача ОЗ, що є основою для подальшого проектування та впровадження.

5. Результати досліджень надають конкретні інженерні рішення для модернізації існуючого парку сушильної техніки типу ДСП, забезпечуючи підвищення її конкурентоспроможності та ефективності обробки насіння ріпаку.

## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1. Аналіз умов праці та обґрунтування необхідності заходів безпеки

Зерносушильний комплекс є об'єктом підвищеної небезпеки, що поєднує високотемпературні процеси, роботу з горючим паливом (газ), наявність рухомих елементів (норії, вентилятори) та потенціал виникнення пожежо- та вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей, що особливо актуально для насіння ріпаку, яке містить значну кількість олійного пилу.

Модернізація агрегату, що передбачає введення зовнішнього охолоджувача (ОЗ) та інтенсифікацію сушильної зони, не повинна призвести до погіршення умов праці. Навпаки, зниження коефіцієнта рециркуляції  $k_{рек}$  мінімізує механічне навантаження на норії та випускні механізми, що зменшує зношування обладнання та утворення олійного пилу, знижуючи загальну вибухонебезпечність.

### 5.2. Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При експлуатації комплексу А1-ДСП-50Е виникає низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які поділяються на фізичні, механічні, хімічні та психофізіологічні.

Таблиця 5.1.

Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

| Група факторів | Виробничий фактор        | Джерело виникнення   |
|----------------|--------------------------|--|
| Фізичні        | 1. Підвищена температура | Гарячі поверхні топки, теплопроводів, шахти, гаряче насіння (на випуску до ОЗ).                          |
|                | 2. Шум                   | Робота високопродуктивних вентиляторів (особливо Ц4-70), норій, газового пальника, випускних механізмів. |
|                | 3. Вібрація              | Робота вентиляторів, норій та їх приводів при дисбалансі.  |

|                              |                              |  |
|------------------------------|------------------------------|--|
|                              | 4. Недостатнє освітлення     | Обслуговування агрегату в нічний час, оглядові вікна.  |
| Механічні                    | 5. Рухомі елементи           | Некриті або неогорожені частини норій, ремінні та ланцюгові передачі, випускні механізми.                            |
|                              | 6. Падіння з висоти          | Обслуговування верхньої частини шахти та бункерів.   |
| Хімічні, Пожежні та Вибухові | 7. Вибухонебезпечні суміші   | Олійний пил ріпаку (дисперсний пил), змішаний з повітрям та гарячими газами (особливо у рециркуляційних контурах).   |
|                              | 8. Пожежонебезпека           | Іскри з топки, неконтрольований нагрів насіння (внаслідок порушення режиму) або скупчення пилу на гарячих елементах. |
|                              | 9. Викиди продуктів згоряння | Неповне згоряння природного газу, витік газу.  |

### 5.3. Оцінка ризиків та спеціальні вимоги до сушіння ріпаку

#### 5.3.1. Пожежна та вибухобезпека

Найбільшу небезпеку при сушінні ріпаку становить олійний пил. Олійний пил ріпаку, на відміну від зернового, має меншу температуру займання і більшу теплотворну здатність, що підвищує ризик вибуху пилоповітряної суміші. У рециркуляційних сушарках ризик посилюється через високу концентрацію пилу в замкнених повітряних потоках та наявність джерел займання (топковий блок).

Заборона використання води. При загорянні зерна в шахті категорично заборонено подавати воду, оскільки це призводить до утворення паро-повітряно-пилової суміші, яка є вибухонебезпечною і може спричинити руйнування агрегату.

Дії при загорянні. негайно припинити подачу палива на форсунку, вимкнути всі вентилятори, терміново випустити зерно з шахти на відкритий майданчик та провести очищення.

### 5.3.2. Термічна безпека насіння

Згідно з технологічними вимогами, максимальна температура нагріву насіння ріпаку не повинна перевищувати 50-60 °С (залежно від призначення). Порушення цього режиму призводить не лише до погіршення якості олії (гідроліз, окислення), але й до небезпеки термічного розкладу та займання. Запропонована модернізація вимагає жорсткого контролю температури на випуску з третьої сушильної секції та на виході з ОЗ.

### 5.4. Розробка та обґрунтування заходів безпеки

Для усунення або мінімізації ідентифікованих небезпечних та шкідливих факторів необхідно впровадити організаційно-технічні та конструктивні заходи.

Таблиця 5.2.

Заходи безпеки та технічні рішення для модернізованого комплексу А1-ДСП-50Е

| Небезпечний фактор            | Захід безпеки (Організаційний та Технічний)  | Обґрунтування  |
|-------------------------------|--|--|
| Пожежа та вибух (Олійний пил) | 1. Аспіраційні системи: Забезпечення ефективної аспірації, регулярне очищення теплопроводів та осаджувальних камер від олійного пилу.                  | Мінімізація концентрації пилу в робочій зоні та запобігання займанню на гарячих елементах.                     |
|                               | 2. Автоматична система пожежогасіння: Встановлення системи подачі негорючого газу (наприклад, вуглекислотного) або порошкового пожежогасіння в шахтах. | Швидка ліквідація займання без ризику вибуху пароповітряної суміші (відповідно до інструкції Інструкція.docx). |
|                               | 3. Контроль температури топки: Встановлення блокування подачі палива при згасанні факела або перевищенні температури теплоносія.                       | Запобігання аварійним ситуаціям та підвищення стійкості горіння.   |
| Рухомі елементи та травматизм | 4. Огородження: Всі рухомі частини (норії, приводи, ремінні передачі) повинні бути обладнані   | Запобігання контакту персоналу з рухомими частинами.   |

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
|                             | захисними огороженнями або кожухами.   |  |
|                             | 5. Електробезпека: Заземлення всього металевого корпусу агрегату та електрообладнання, використання захисних вимикаючих пристроїв.                           | Захист від ураження електричним струмом.   |
| Шум та Вібрація             | 6. Звукоізоляція та амортизація: Застосування звукоізоляційних кожухів для потужних вентиляторів та віброгасні прокладки під двигунами та рамами.            | Зниження рівня шуму до допустимих санітарних норм (80 дБА).                                  |
| Падіння з висоти            | 7. Безпечний доступ: Обладнання всіх робочих площадок та сходів міцними огороженнями та надійними засобами доступу (сходи, перехідні містки).                | Забезпечення безпечного обслуговування верхньої частини агрегату.                            |
| Термічна безпека насіння    | 8. Автоматичний контроль: Встановлення дистанційної термометрії з автоматичним блокуванням випуску при перевищенні допустимої температури насіння (50–60°C). | Запобігання термічній деградації продукту та ризику займання.                                |
| Експлуатаційна безпека (ОЗ) | 9. Безпека зовнішнього охолоджувача (ОЗ): Забезпечення вільного доступу до випускних механізмів ОЗ та відведення гарячого повітря через теплопровід.         | Забезпечення безпечної роботи нового інтегрованого модуля та використання рекуперації тепла. |

Впровадження розроблених заходів дозволить забезпечити надійну та безпечну експлуатацію модернізованого сушильного комплексу А1-ДСП-50Е, мінімізуючи ризики, пов'язані з обробкою насіння ріпаку.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконані теоретичні та конструктивно-технологічні дослідження підтвердили доцільність і ефективність вдосконалення процесів післязбиральної обробки насіння ріпаку, що забезпечує підвищення якісних показників кінцевого продукту та економічної ефективності виробництва. Основні результати роботи можуть бути сформульовані наступним чином.

1. На основі аналізу технологічних вимог до високоолійних культур підтверджено критичну необхідність оперативного зниження вологості насіння ріпаку до 7-8% після збирання для запобігання процесам гідролізу та самозгрівання, які погіршують якість олії. Це вимагає впровадження інтенсифікованих, але контрольованих режимів сушіння.

2. Обґрунтовано та реалізовано конструктивно-технологічне вдосконалення зерносушарки шахтного типу (на прикладі агрегату А1-ДСП-50Е), що передбачає трансформацію внутрішньої зони охолодження на третю додаткову сушильну секцію.

3. Доведено можливість критичного зниження коефіцієнта рециркуляції  $k_{рек}$  з типових значень 4.0-5.0 до 3.0 за рахунок інтенсифікації процесу сушіння. Це мінімізує механічне навантаження на насіння, що є вирішальним фактором для олійних культур.

4. Технологічна схема модернізації передбачає рекуперацію теплової енергії відпрацьованого агента сушіння із зовнішнього охолоджувача, що забезпечує зниження питомих витрат палива.

5. Розроблений комплекс заходів з охорони праці забезпечує безпечну експлуатацію модернізованого сушильно-очисного комплексу. Особливу увагу приділено протипожежній та вибуховій безпеці, пов'язаній з олійним пилом ріпаку, шляхом впровадження систем аспірації та суворого контролю температурних режимів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Особливості процесу сушіння сільськогосподарських матеріалів методом протитечії / В.Ф. Дідух // Збірник наукових статей РВВ ЛДТУ. – Луцьк, 1998. – Вип. 3. – С. 38–41.
2. Переваги сушіння насінневих матеріалів методом протитечії / В.Ф. Дідух // Збірник наукових статей РВВ ЛДТУ. – Луцьк, 2000. – Вип. 6. – С. 59–63.
3. Дідух В.Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних рослинних матеріалів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / В.Ф. Дідух. – Луцьк, 2003. – 274 с.
4. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Зерносушильна установка з киплячим шаром для сушіння зернових як об'єкт автоматизації / С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2006. – Вип. 17. – С. 61–66.
5. Осадчий С.І., Калита М.О., Скриннік І.О. Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з киплячим шаром у реальних експлуатаційних умовах / С.І. Осадчий, М.О. Калита, І.О. Скриннік // Вісник ХНТУ. – Харків, 2008. – Вип. 73, Т. 2. – С. 43–45.
6. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах / С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік // Вісник Хмельницького НТУ. – Хмельницький, 2007. – Вип. 3, Т. 1. – С. 38–41.
7. Петренко М.М., Скриннік І.О. Зерносушильна установка касетного типу для сушіння зернових культур / М.М. Петренко, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського НТУ. – Кіровоград, 2004. – Вип. 15. – С. 318–323.
8. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники її роботи / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Конструювання,

виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2006. – Вип. 36. – С. 29–34.

9. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Детермінована математична модель руху насіння по каскадах зерносушарки каскадного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2007. – Вип. 37. – С. 299–304.

10. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів на процес сушіння зернових культур у зерносушарці каскадного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2007. – Вип. 3, Т. 12. – С. 53–59.

11. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Визначення швидкості фільтрації та гідравлічного опору на каскадах сіток зерносушарки касетного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2005. – Вип. 34. – С. 160–165.

12. Петренко М.М., Сабірзянов Т.Г., Скриннік І.О. Модель переносу тепла в зерносушарці каскадного типу від каскаду до шару насіння / М.М. Петренко, Т.Г. Сабірзянов, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського НТУ. – Кіровоград, 2008. – Вип. 20. – С. 293–298.

13. Петренко М.М., Скриннік І.О., Скриннік М.О. Модель зміни шпаруватості псевдо розрідження шару насіння на каскадах зерносушарки касетного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, М.О. Скриннік // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 258–264.

14. Сало В.М., Скриннік І.О. Вплив основних параметрів зерносушарки каскадного типу на процес сушіння зернових культур у киплячому стані / В.М. Сало, І.О. Скриннік // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 215–220.

15. Патент України на корисну модель № 10346 У. Зерносушильна установка касетного типу : деклараційний патент / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Кіровоградський НТУ ; заявл. 18.04.2005 ; опубл. 15.11.2005. – 4 с.
16. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 960 p.
17. Ratti C. Hot Air and Freeze-Drying of High-Value Foods: A Review / C. Ratti // Journal of Food Engineering. – 2001. – Vol. 49, No. 4. – P. 311–319.
18. Verma L.R., Bucklin R.A. Postharvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds / L.R. Verma, R.A. Bucklin. – Boulder : Westview Press, 1996. – 354 p.
19. Chen X.D., Mujumdar A.S. (eds.) Drying Technology in Agriculture and Food Sciences / X.D. Chen, A.S. Mujumdar. – Boca Raton : CRC Press, 2008.
20. Bimakr M., Ghanbarzadeh B., Shahidi F., et al. Drying Technologies for Improving Nutraceuticals and Bioactive Compounds in Foods: A Review / M. Bimakr, B. Ghanbarzadeh, F. Shahidi et al. // Food Reviews International. – 2017. – Vol. 33, No. 2. – P. 145–168.
21. Aguilera J.M., Stanley D.W. Microstructural Principles of Food Processing and Engineering / J.M. Aguilera, D.W. Stanley. – New York : Springer, 1999. – 480 p.
22. Henderson S.M., Perry R.L. Agricultural Process Engineering / S.M. Henderson, R.L. Perry. – Westport : AVI Publishing, 1983. – 460 p.
23. Fellows P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice / P.J. Fellows. – 4th ed. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2016.
24. Masters K. Introduction to Environmental Engineering and Science / K. Masters. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1998.
25. Barbosa-Cánovas G.V., Juliano P. (eds.) Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality / G.V. Barbosa-Cánovas, P. Juliano. – New York : Springer, 2010.
26. Технологія післязбиральної обробки та сушіння зерна [Електронний ресурс] // propozitsiya.com. – Режим доступу : <https://propozitsiya.com/tehnologiya-pislyazbiralnoyi-obrobki-ta-sushinnya-zerna>.

27. ДСТУ 4966:2008 Насіння ріпаку для промислового перероблення. Технічні умови. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 14 с.
28. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
29. Юхименко М. П. Гідродинаміка та тепломасообмін у апаратах із фонтануючим шаром : автореф. дис. канд. техн. наук / М. П. Юхименко. – Суми, 2011. – 20 с.
30. Технічний опис та інструкція з експлуатації зерносушарки шахтної рециркуляційної А1-ДСП-50Е. – К. : KMZ Industries, 2021.
31. Кірпа М. Я. Сушіння та зберігання насіння ріпаку / М. Я. Кірпа // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 6. – С. 40–43.
32. ПАОП 0.00-1.71-13 Правила охорони праці для об'єктів по переробці зерна. – К. : Держгірпромнагляд України, 2013.
33. Закон України «Про охорону праці» : від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ [із змінами та доповненнями від 2024 р.].

## **ДОДАТКИ**