

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:**

«Механізація післязбирального обробітку соняшника з обґрунтуванням
параметрів аспіратора гравітаційного типу»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи АІ-24М-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____ Слюсарев Ярослав Андрійович

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Олег БЕВЗ

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз післязбиральної обробки соняшника, який виявив недостатню продуктивність системи. Для оптимізації запропоновано модернізацію гравітаційного сепаратора шляхом інтеграції системи аспірації та заміни сітчастих решіт на пруткові з регульованим зазором. Моделювання підтвердило високу селективність пневмосепарування у зигзагоподібному каналі. Виконано інженерне обґрунтування кількості каскадів решіт. Впровадження знижує енергоспоживання і забезпечує швидку окупність інвестицій за рахунок підвищення якості продукту.

гравітаційний сепаратор, система аспірації, пруткове решето, моделювання

ABSTRACT

An analysis of post-harvest processing of sunflower was conducted, which revealed insufficient system performance. For optimization, it was proposed to modernize the gravity separator by integrating an aspiration system and replacing mesh sieves with rod sieves with adjustable gap. Modeling confirmed the high selectivity of pneumatic separation in a zigzag channel. An engineering justification of the number of sieves cascades was performed. The implementation reduces energy consumption and provides a quick return on investment by improving product quality.

gravity separator, aspiration system, rod sieve, modeling

ЗМІСТ

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ
1	Вступ
2	Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень
3	Наукова частина
4	Практична реалізація результатів досліджень
5	Охорона праці
6	Висновок
	Список використаної літератури
	Додатки

1. ВСТУП

Загальновідомою є стратегічна важливість соняшника як однієї з ключових олійних культур у світовому та, зокрема, українському агропромисловому комплексі [4]. Зростання обсягів виробництва та підвищення вимог до якості насіння для олійної промисловості та насінництва висувають нові виклики до технологій післязбиральної обробки.

Навіть незначне підвищення чистоти насіння та зниження вмісту домішок (легких, важких, щуплого насіння) без значних втрат основної культури безпосередньо впливає на рентабельність переробки та зберігання. Існуючі універсальні очисні машини часто не забезпечують оптимальної ефективності для специфічної суміші "насіння-домішки" після збирання соняшника, що призводить до зайвих енерговитрат на подальше сушіння та очищення [4].

Незважаючи на наявність повітряно-решітних машин, зерноочисна машина гравітаційного типу з інтегрованим аспіратором має низку переваг, які обґрунтовують його актуальність. Зокрема, паралельне видалення легких домішок аспіраційною системою знижує навантаження на решітну систему, дозволяючи їй більш ефективно виконувати сепарацію за розмірами.

Тому постає задача по оптимізації конструкції гравітаційного аспіратора, заснована на точних аеродинамічних розрахунках, що дозволить мінімізувати енерговитрати на створення повітряного потоку, необхідного для ефективної сепарації. Практична цінність полягає у розробці конструктивних та технологічних рішень для створення вискоефективного та енергоощадного гравітаційного аспіратора, адаптованого до післязбиральної обробки соняшника,

Таким чином, механізація післязбиральної обробки соняшника шляхом впровадження спеціалізованого аспіратора гравітаційного типу та наукового обґрунтування його параметрів є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення економічної ефективності галузі та забезпечення високої якості олійної сировини.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування комплексної механізації післязбирального обробітку.

Ефективна механізація післязбирального обробітку соняшника – це не просто завершальний етап виробничого процесу, а критично важлива ланка в ланцюгу виробництва, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, збереження врожаю та прибутковість господарства в цілому. Для господарства, яке займається вирощуванням соняшника в умовах Північного степу України, акцент слід робити на оперативність, енергоефективність та мінімізацію втрат.

Основними етапами післязбиральної доробки соняшника є очищення та сушіння (за необхідності), а потім зберігання. Зважаючи на практичний досвід і прикладні дослідження [2-4], можемо виділити наступні етапи післязбирального обробітку і їх технологічне забезпечення (табл. 2.1), враховуючи середньостатистичну рентабельну площу вирощування в одному господарстві.

Таблиця 2.1 – Технологічне забезпечення післязбирального обробітку соняшнику (площа районування 800 га)

Етап	Мета	Рекомендоване обладнання (зразковий приклад)	Примітка
1	2	3	4
1. Попереднє очищення	Відділення грубих, легких та великих домішок.	Зерноочисні машини загального призначення (наприклад, ОВС-25, КЗС-25, Petkus K527, БСХ-100).	Продуктивність має відповідати швидкості надходження з поля (наприклад, 25-50 т/год).
2. Сушіння (за потреби)	Зниження вологості до	Шахтна або модульна	Потужність має забезпечувати

Етап	Мета	Рекомендоване обладнання (зразковий приклад)	Примітка
1	2	3	4
	базисних/безпечних норм (до 7-9% для зберігання).	зерносушарка (наприклад, М-8, ДСП-32, GSI).	обробку добового надходження вологого зерна.
3. Первинне очищення	Відділення крупних, легких та специфічних домішок.	Сепаратори повітряно-решітні, трієри (наприклад, БЦС-25, КЗС-25, БСХ-100, БТ-800).	Продуктивність має відповідати швидкості надходження після сушіння (наприклад, 15-30 т/год).
4. Вторинне (фінальне) очищення	Відділення дрібних домішок, битих зерен, смітєвих частинок.	Повітряно-решітні сепаратори (наприклад, Petkus К-531, Cimbria, Bühler).	Забезпечує товарну і посівну якість насіння.
5. Зберігання	Тимчасове чи довготривале збереження врожаю.	Металеві силоси з активною вентиляцією (наприклад, GSI, Sukup, KMZ Industries).	Обов'язкова система контролю температури та вологості.

Для розрахунку використаємо усереднені показники для зазначених умов районування Кіровоградщини:

- площа: $A = 800$ га.
- усереднена врожайність: $V=2,5$ т/га (типова для регіону, може

коливатися 2,0...4,5 т/га).

- валовий збір: $M = A \cdot U = 800 \text{ га} \times 2,5 \text{ т/га} = 2000 \text{ тонн}$.
- базисна вологість: $B_{\text{баз}} = 7\%$.
- фактична вологість після збирання (середньостатистична): $B_{\text{факт}} = 12\%$.
- період збирання: $Дні_{\text{зб}} = 15 \text{ днів}$.

Щоб обробити 2000 тонн за 15 днів, потрібно забезпечити добову продуктивність:

$$Д_{\text{обс}} = M / Дні_{\text{зб}} = 2000 / 15 \approx 133,3 \text{ т/добу.}$$

При роботі, наприклад, $T_{\text{оч}} = 10$ годин на добу, годинна продуктивність обладнання ліній попереднього очищення повинна становити, не менше:

$$Пр_{\text{оч}} = Д_{\text{обс}} / T_{\text{оч}} = 133,3 / 10 \approx 13,3 \text{ т/год.}$$

Отже, необхідно мати зерночисну машину з фактичною продуктивністю на соняшнику не менше 15...20 т/год (з запасом на нерівномірність надходження). До прикладу, таку продуктивність забезпечують машини ОВС-25, БЦС-25 (на соняшнику близько 12-15 т/год), або більш продуктивніший аналог БСХ-100 (на соняшнику до 50 т/год).

Розрахуємо потребу в сушінні. Якщо вологість $12\% > 7\%$, необхідне сушіння, метою якого є зняття 5% вологи.

Модульні сушарки на 5% знятті вологи мають продуктивність $П_{\text{суш}} \approx 10$ т/год, таким чином, тривалість роботи сушарки для підсушування всього обсягу матеріалу становитиме:

$$Ч_{\text{суш}} = M / П_{\text{суш}} = 2000 / 10 = 200 \text{ годин,}$$

або

$$Ч_{\text{суш.д}} = 200 / 24 \approx 8,3 \text{ доби безперервної роботи.}$$

Таким чином, сушарка продуктивністю 10 т/год забезпечить обробку валового збору протягом 8...9 днів, що є дуже оперативним показником і дозволяє не затримувати збір.

Для зберігання 2000 тонн соняшника потрібно забезпечити об'єм ємностей, який відповідатиме наступному:

$$Об_{сил} = M \cdot K_{зан} = 2000 \cdot 1,3 = 2600 \text{ тонн,}$$

де $K_{зан}$ – запас технологічного об'єму ємностей для зберігання.

Отже, можна рекомендувати два-три силоси місткістю по 700...1000 тонн кожен. Вони мають бути оснащені системами активної вентиляції та температурного контролю для запобігання самозігріванню та псуванню.

Пропонуємо оригінальний підхід для господарства, обсяг районування соняшника в якому становить 800 га, основними концепціями якого є:

1. Мобільність та гнучкість – замість стаціонарного, надто потужного елеватора, господарство використовує модульні рішення. Це дозволяє швидко вводити об'єкти в експлуатацію і, за потреби, нарощувати потужності або перепрофілювати елементи для інших культур (наприклад, для кукурудзи чи пшениці).

2. Енергоефективне сушіння – вибір на користь рекуперативних сушарок (з повторним використанням тепла) або сушарок, що працюють на альтернативному паливі (наприклад, пелети з лушпиння соняшника, яке є побічним продуктом переробки), значно знижує собівартість доробки.

3. Автоматизований контроль – встановлення автоматизованих систем контролю якості (вологість, засміченість) та температурного моніторингу в силосах. Це дозволяє управляти процесом обробки віддалено, мінімізуючи людський фактор та ризики втрат.

4. Зберігання в «інертному середовищі» – використання активної вентиляції для охолодження соняшника до 8 °С...10 °С навіть при зовнішній температурі 20 °С, що створює майже інертне середовище, в якому

сповільнюються всі біологічні та хімічні процеси, гарантуючи довготривале зберігання без погіршення якості.

Це забезпечить не лише механізований обробіток, але й оптимізоване управління потоками, що є ключовим для господарства середнього розміру на Кіровоградщині.

Виконаємо оптимізаційний технологічний розрахунок відповідно до запропонованої концепції.

Будемо виходити з попередніх розрахунків, відповідно до яких добовий обсяг обробки має становити приблизно 135 т/добу (2000 т / 15 днів), а фактична продуктивність системи має бути близько 20 т/год (з урахуванням можливих простоїв і пікових навантажень).

Таблиця 2.2 – Технологічне оснащення проєктної системи

Етап	Обсяг / Продуктивність	Рекомендований перелік обладнання	Характеристики (на соняшнику)
1	2	3	4
Приймання та Накопичення	Добовий обсяг: 135 т.	Приймальний бункер (завальна яма)	Об'єм 50...70 м ³ (на 1-2 повних автомобільних причепи), 3 решіткою.
Попереднє очищення	$Pr_{оч} = 20$ т/год	Вібровідцентрова ЗОМ БЦС-50	Номінальна продуктивність 50 т/год (на соняшнику 20...25 т/год); ефект сепарації до 80 %.
Сушіння (з 12% до 7%)	$Pr_{суш} = 10$ т/год (для 8 діб роботи)	Модульна сушарка М-8/10 або Шахтна ДСП-32 (знижена продуктивність)	Фактична продуктивність на соняшнику (при знятті 5% вологи) 10...12 т/год.
Первинне	$Pr_{оч} = 15$ т/год	Гравітаційний	Фактична

Етап	Обсяг / Продуктивність	Рекомендований перелік обладнання	Характеристики (на соняшнику)
1	2	3	4
очищення		аспіратор ГА-25	продуктивність на соняшнику 15...20 т/год.
Фінальне очищення	$Pr_{оч} = 15$ т/год	Petkus K-531 Gigant або ЛУЧ ЗСК-15	Фактична продуктивність на соняшнику 10...15 т/год.
Зберігання	Обсяг: 2000 т.	Силоси GSI/KMZ/Sukur	3 силоси по 700 тонн (діаметр 9...11 м).

Транспортна система (норії та конвеєри) є «артеріями» елеваторного комплексу. Їхня продуктивність повинна перевищувати продуктивність найпотужнішого елемента в системі (в нашому випадку – це БЦС-50 або сумарної продуктивності сушарки / фінального очищення). Прийmemo уніфіковану продуктивність транспортерів 25...30 т/год.

Таблиця 2.3 – Транспортна система проєктної технології

Етап	Функція	Рекомендоване обладнання	Кількість	Примітка
1	2	3	4	5
1. Подача на очищення	Підйом зерна із завальної ями до первинного сепаратора.	Норія ковшова НЦ-25/30	1 шт.	Висота підйому 10...15 м.
2. Подача на сушіння	Транспортування очищеного соняшника до сушарки.	Норія ковшова НЦ-25/30	1 шт.	Розміщується після первинного сепаратора.

Етап	Функція	Рекомендоване обладнання	Кількість	Примітка
1	2	3	4	5
3. Вивантаження із сушарки	Переміщення сухого соняшника.	Норія ковшова НЦ-25/30	1 шт.	Висота підйому на силос (до 30 м).
4. Подача на первинне і фінальне очищення	Додаткова норія / конвеєр для гнучкості.	Норія НЦ-25 або ланцюговий конвеєр ТСЦ-30	1 шт.	Може використовуватися для переміщення між силосами.
5. Горизонтальне транспортування	Розподіл насіння у надсилосній галереї.	Ланцюговий конвеєр ТСЦ-30	1 комплект	Потрібний для рівномірного завантаження 3-х силосів.
Бункери-накопичувачі	Забезпечення буферної ємності між процесами.	Бункер вологого зерна (перед сушаркою) та Бункер чистого зерна (перед зберіганням).	2 шт.	Об'єм кожного 25...50 м ³ (на 1,5...2 години роботи сушарки / сепаратора).

Деякі висновки відповідно до зазначеного технологічного потоку.

Обмежуючим (найменша продуктивність) елементом системи є сушарка (10...12 т/год). Це диктує загальну швидкість дробки.

Транспортне обладнання (норії) підбирається з запасом (25...30 т/год), щоб не обмежувати сепаратори, коли сушарка простоює, або коли сушіння не потрібне (пряме завантаження в силос).

Бункери-накопичувачі (хопери) є ключовими для буферизації. Вони дозволяють первинному очищенню працювати дискретно (залежно від надходження з поля), поки сушарка працює безперервно.

Цей комплекс є оптимальним для 800 га, забезпечуючи високу оперативність та можливість гнучкого управління процесами дробки соняшника в умовах Кіровоградщини.

Продуктивність транспортного обладнання $P_{транс}$ повинна перевищувати продуктивність сепараторної системи:

$$P_{транс} > 1,25 \cdot P_{оч},$$
$$P_{транс} = 1,25 \cdot 20 = 25 \text{ т/год.}$$

Найскладніший і найбільш енергоємний етап – сушіння. Розрахунок ведемо за показником знімання вологи та зниженням маси.

Кількість вологи, яку потрібно випарувати, призводить до зменшення загальної маси зерна:

$$U_{маса} = M \cdot (1 - (100 - B_{факт} / 100 - B_{баз})),$$
$$U_{маса} = 2000 \cdot (1 - (100 - 12 / 100 - 7)) \approx 107,4 \text{ т.}$$

Маса сухого соняшника:

$$M_c = 2000 - 107,4 = 1892,6 \text{ т.}$$

Необхідну продуктивність сушарки $P_{суш}$ визначимо з умови необхідності обробити 2000 т за 15 днів, але сушарка може працювати цілодобово ($T_{доб} = 24$ год.).

Загальний час сушіння:

$$T_{\Sigma} = D_{зб} \cdot T_{доб} = 15 \cdot 24 = 360 \text{ год.}$$

Для оперативності використаємо 8-денний ($T_{\Sigma 8} = 192$ год) чистий час роботи:

$$P_{суш} = M / T_{\Sigma 8} = 2000 / 192 = 10,4 \text{ т/год.}$$

Даним умовам відповідає модульна сушарка М-10 або Шахтна ДСП-32 (при роботі на соняшнику, знімаючи 5% вологи).

Соняшник має низьку насипну густину $\gamma_{сон}$, яку слід враховувати при розрахунку об'єму силосів. Прийнемо середню насипну густину соняшника $\gamma_{сон} = 0,4 \text{ т/м}^3$, тоді об'єм силосів складе:

$$V_{сил} = M / \gamma_{сон} = 2000 / 0,4 = 5000 \text{ м}^3.$$

Вибираємо силоси з металу (плоскодонні або конусні) з активною вентиляцією, виходячи з умов розрахованого об'єму 5000 м^3 , раціональним при цьому є застосування 3 силосів по $1800 \dots 2000 \text{ м}^3$ кожен, що відповідає місткості приблизно $700 \dots 800$ тонн соняшника на один силос. Даним умовам відповідають силоси діаметром $10 \dots 11$ м та висотою $15 \dots 20$ м від KMZ Industries.

Буферні ємності $V_{буф}$ необхідні для забезпечення безперебійної роботи лімітуючої операції – сушарки, при цьому рекомендований запас становить $T_{\Sigma буф} = 1,5 \dots 2$ години роботи сушарки:

$$V_{буф} = P_{суш} \cdot T_{\Sigma буф} \cdot 1 / \gamma_{сон} ,$$

$$V_{буф} = 10,4 \cdot 2,0 \cdot 1 / 0,4 = 52 \text{ м}^3.$$

Раціональний тип обладнання:

1. Бункер вологого зерна (перед сушаркою): 50...60 м³.
2. Бункер чистого зерна (перед первинним / фінальним очищенням / зберіганням): 50...60 м³.

Таким чином, нами виконано технологічне обґрунтування раціонального застосування засобів механізації для післязбирального обробітку насіння соняшника. Одним з етапів даного процесу є первинне очищення, яке вимагає застосування високоточного і одночасно високопродуктивного обладнання.

2.2. Опис об'єкту розробки

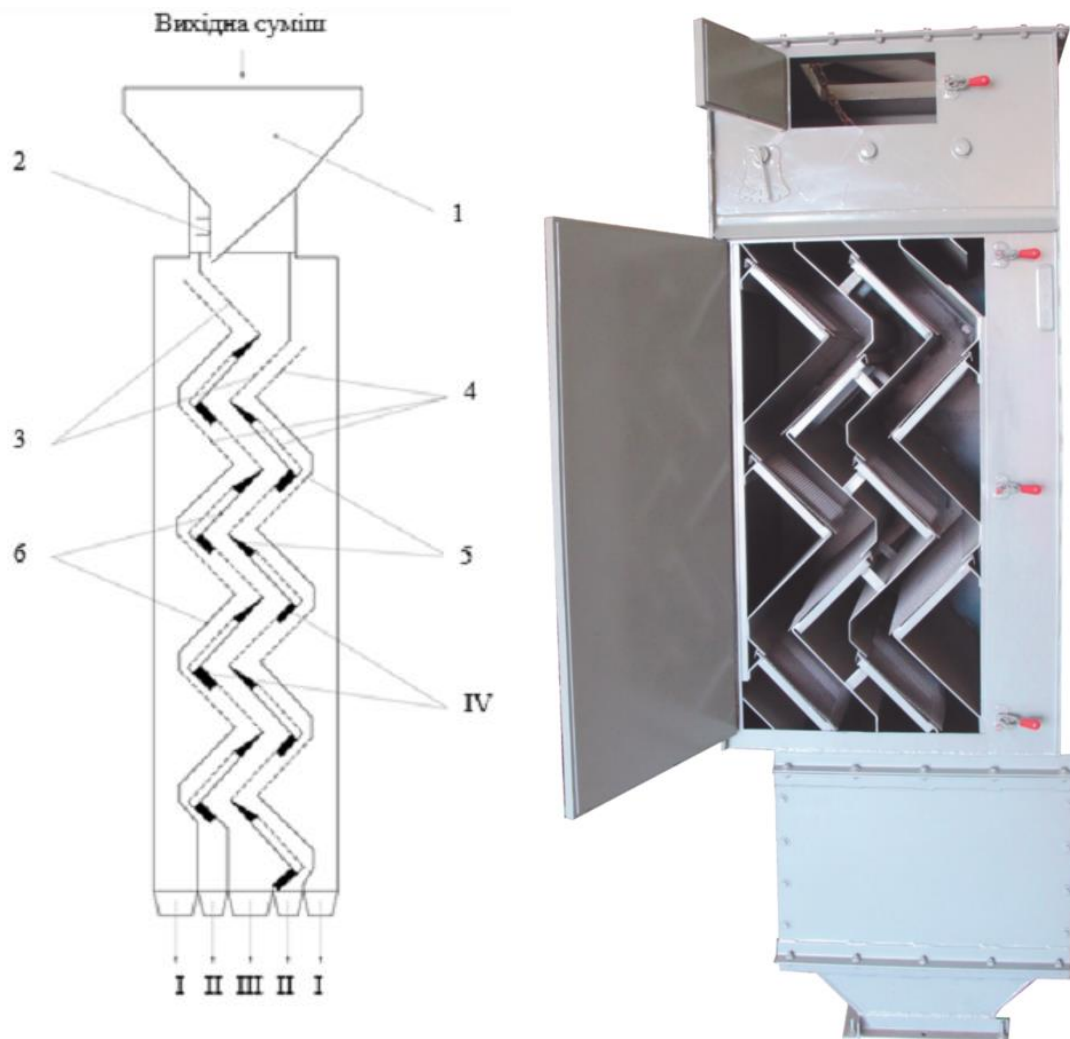
Забезпечення прогресу матеріально-технічної бази для післязбиральної обробки вимагає впровадження новітніх знань та робочих органів. Це необхідно для формування технологічно ефективних і ресурсощадних комплексів для обробки та насінництва.

Традиційні зерноочисні машини переважно використовують решітні робочі органи з активним приводом. Їхня конструктивна складність негативно впливає на процес очищення, знижує експлуатаційну надійність та спричиняє невиправдані енергетичні втрати – як на етапі виробництва, так і під час безпосередньої роботи [5-13].

Водночас, розроблено гравітаційні зерноочисні машини, де зерновий матеріал переміщується самопливом по стаціонарно закріплених решетах [5, 6, 13]. Принцип роботи цього типу машин (рис. 2.1) наступний.

Сировина потрапляє у завантажувальний бункер (1) і під дією сили тяжіння спрямовується на суцільну скатну поверхню – відбивач. Зернові частки, скочуючись, потрапляють на перше решето (3), розмір зазору якого обраний так, щоб дрібніші фракції могли безперешкодно пройти. Частина цього потоку виділяється на скатній поверхні (5) та решеті (3), надходить на дефлектор (6) і виводиться через спеціальний бічний патрубок. Решта матеріалу продовжує свій

рух під дією гравітації, сходячи по решету на другу скатну поверхню (4), розташовану протилежно.



1 – накопичувальний бункер; 2 – регульовальна заслінка подачі; 3 – сепарувальні колосові решета; 4 – сепарувальні підсівні решета; 5 – відбивачі; 6 – дефлектори; I, II, III, IV – патрубки вивідні.

Рис. 2.1 Схематичне зображення та загальний вигляд гравітаційного сепаратора [6]

Поділ фракцій відбувається каскадно: зерновий матеріал продовжує рух, потрапляючи з першого відбивача на друге решето (рис. 2.2), процес повторюється на третьому відбивачі і наступному решеті, і так далі – аж до останнього. Повнота виділення дрібних (проходових) фракцій безпосередньо залежить від кількості цих послідовно встановлених решіт і скатних поверхонь у машині.

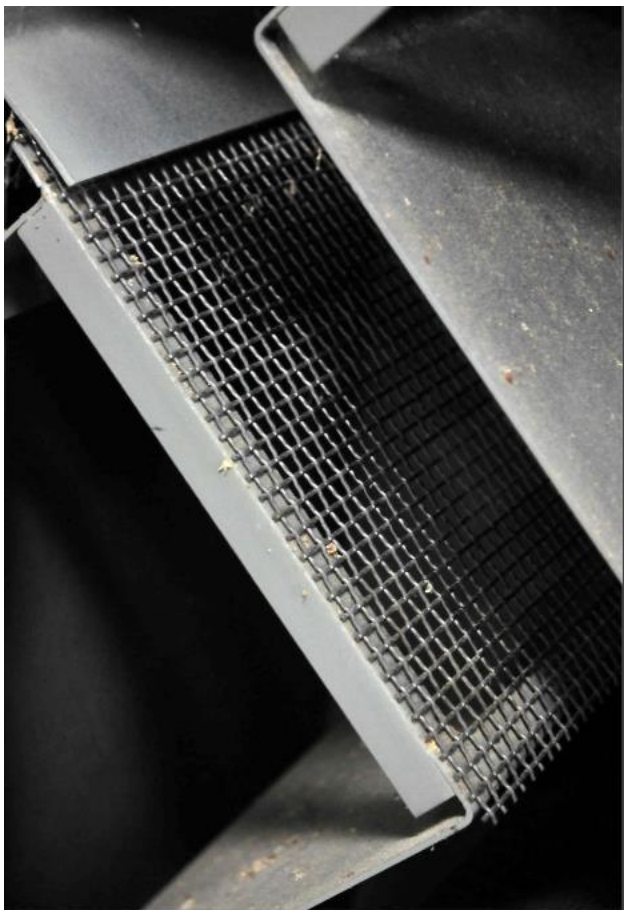


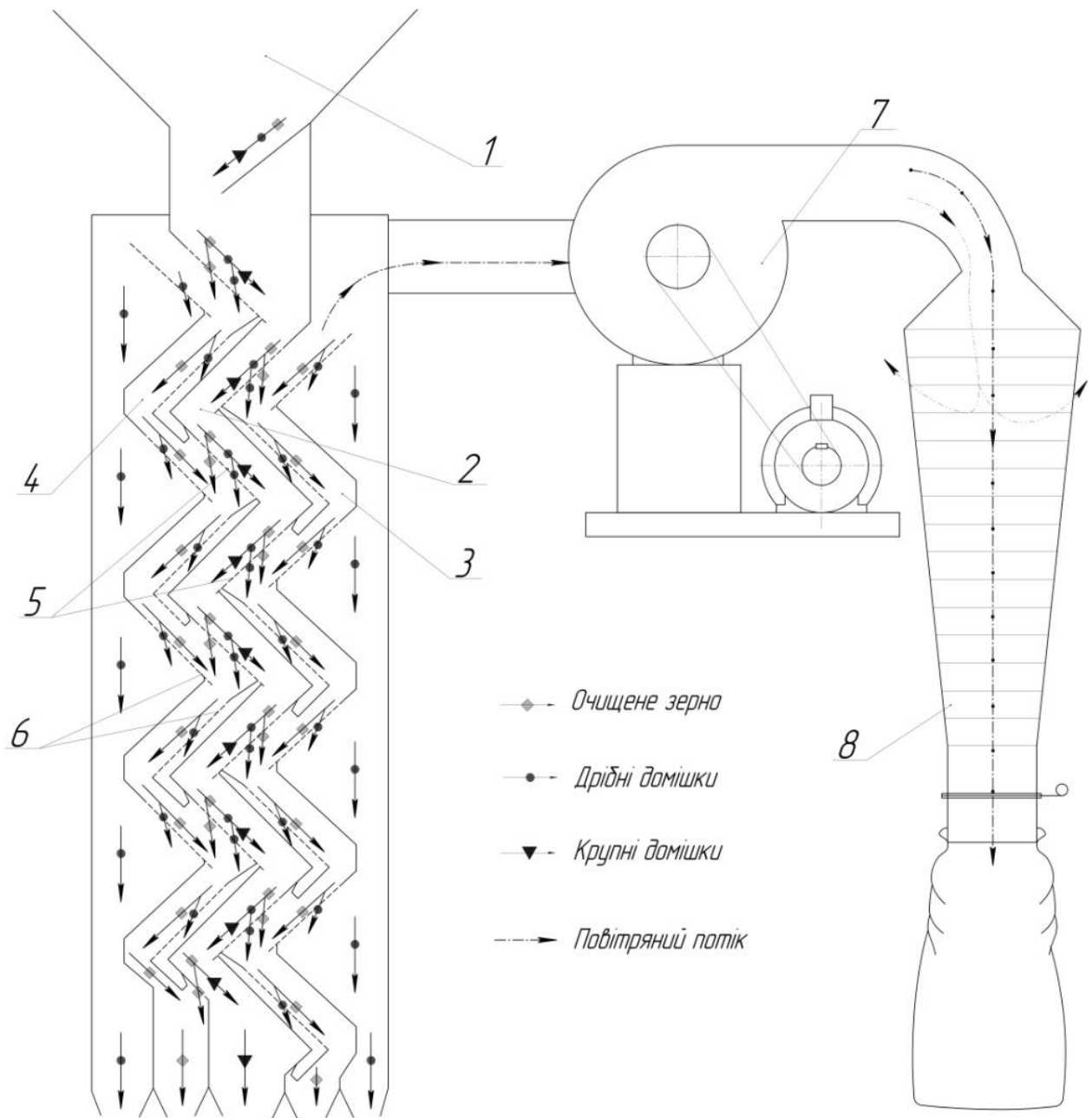
Рис. 2.2 – Решето центрального каналу сепаратора MAGIK KLEENER

З метою мінімізації експлуатаційних витрат та підвищення функціональності гравітаційної зерноочисної машини, ми пропонуємо її докорінну модернізацію. Це передбачає оновлення сепаруючого модуля та інтеграцію повноцінної системи аспірації (рис. 2.3).

Модернізований сепаруючий модуль має інноваційну будову: він складається з центрального та двох паралельних бічних зигзагоподібних каналів, утворених каскадом решіт. Додатково впроваджена система аспірації, яка включає відцентровий вентилятор, електропривод та пилоочисник.

Центральний зигзагоподібний канал призначений для первинного виділення великих домішок. Бічні зигзагоподібні канали забезпечують точне відокремлення дрібних домішок.

Аспіраційна система ефективно усуває легкі домішки із зернової маси.



1 – бункер; 2 – центральний канал; 3, 4 – бічні канали; 5 – решета колосового типу; 6 – решета підсівного типу; 7 – джерело повітряного потоку; 8 – пилоочисна система.

Рис. 2.3 – Проектована схема гравітаційного аспіратора

Сепаруючі решета для мінімізації опору повітряному потоку та інтенсифікації процесу поділу за розмірами пропонується встановити пруткового типу (рис. 2.4) з жорсткою фіксацією кінців.

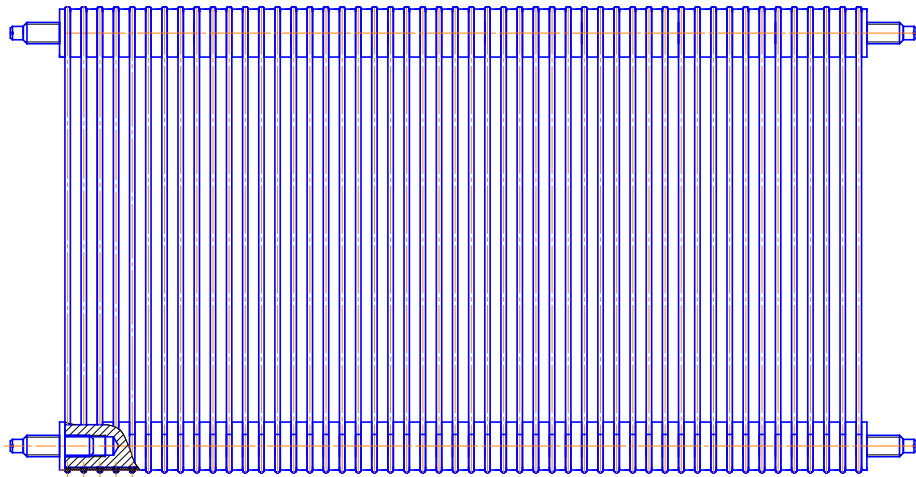


Рис. 2.4 – Решето колосове пруткового виконання

Агротехнічні нормативи встановлюють чіткі критерії до роботи зерноочисної машини: вона зобов'язана забезпечити мінімальний ефект первинного очищення зернового матеріалу на рівні 60%. Водночас, недопустимим є перевищення граничного значення втрат якісного (повноцінного) зерна більше 0,2%.

Висновки

Шляхом виконання технологічних розрахунків було детально обґрунтовано необхідність та етапність технологічної операції післязбиральної обробки на зерносушильному комплексі. Зокрема, встановлено, що обробка 2000 тонн соняшнику вимагатиме 15 діб.

З метою підвищення економічної ефективності та скорочення загальних термінів післяжнивного обробітку, обрана схема потребує оптимізації, що включає:

- оптимізацію експлуатаційної продуктивності наявного сушильного обладнання;
- забезпечення потокового режиму обробки шляхом раціонального поєднання зерноочисних машин, узгоджених за продуктивністю.

Аналіз наукової літератури, патентних рішень та результати попередніх випробувань вітчизняних та зарубіжних аналогів стали основою для модернізації

гравітаційного сепаратора. Були внесені такі ключові конструктивні зміни у базову модель:

- сітчасті решета замінені на пруткові аналоги з можливістю регулювання зазору. Це рішення забезпечує зменшення собівартості переобладнання агрегату для різних зернових культур;

- розроблено та обґрунтовано систему аспірації, функція якої – ефективне видалення легких домішок. Таким чином було підвищено багатофункціональність сепаратора.

Запропоновані зміни потребують обґрунтування параметрів і режимів роботи оновленого сепаратора при очищенні важкосепаруємих зернових сумішей.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Теоретичний аналіз аеродинамічної сепарації

У процесі розділення зерноsumіші соняшника за аеродинамічними властивостями основним фактором є взаємодія частинок із повітряним потоком, який рухається назустріч зерновому потоку в системі зигзагоподібних каналів сепаратора.

Легкі домішки мають меншу густину та більшу аеродинамічну площу, тому сила опору повітря для них суттєво перевищує вагу частинки, що забезпечує їх винесення потоком. Основне зерно, навпаки, має більшу масу та інерцію, тому проходить каскади донизу.

У двомірній декартовій системі координат (рис. 3.1) (вісь x – вертикальна, напрямлена вгору, вісь y – горизонтальна) рух частинки описується системою рівнянь.

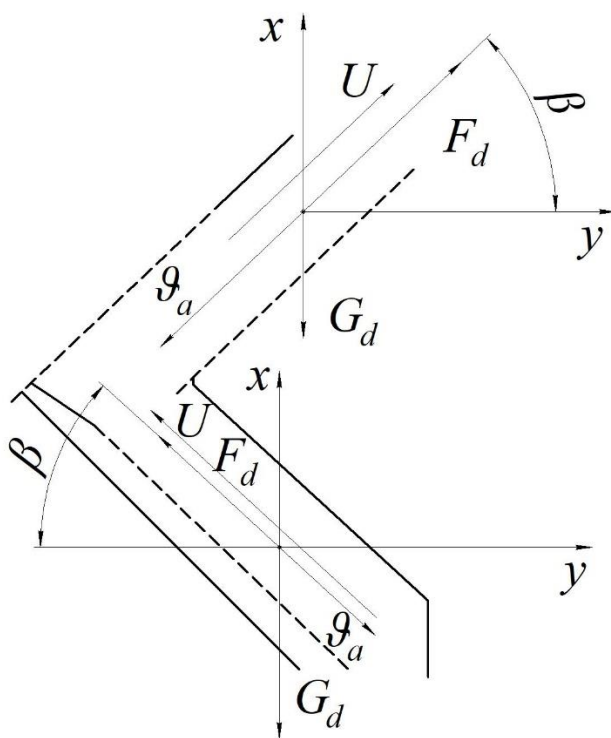


Рис. 3.1 – Схема сил, що діють на частку в повітряному потоці гравітаційного аспілятора

Введенні позначення і умови:

- положення частинки: $r(t) = (x(t), y(t))$;

- швидкість частинки: $v(t) = (v_x(t), v_y(t)) = \dot{r}$;

- поле швидкостей повітря: $u(r, t) = (u_x, u_y)$. Для простоти вважатимемо однорідний зустрічний потік $u = (U, 0)$ ($U > 0$ – вгору);

- маса частинки m , гравітація g (діє вниз, у нашій системі – проекція $-g$ по x);

- сила аеродинамічного опору (два стандартні наближення):

- лінійний (Стокса) для малих Re : $F_d = -\kappa(v - u)$, де $\kappa = 6\pi\mu R$ (приблизно для сфер; μ – динамічна в'язкість повітря, R – ефективний радіус частинки);

- квадратичний (інерційний) для середніх / великих Re :

$F_d = -\frac{1}{2}C_d\rho_a A|v - u|(v - u)$, де A – проекція площі, C_d – коефіцієнт опору, ρ_a – густина повітря.

Запишемо дифференціальні рівняння взаємодії згідно закону Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = mg + F_d.$$

Тобто в компонентах:

- для квадратичного опору

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = -mg + \frac{1}{2}C_d\rho_a A(U - v_x)\sqrt{(U - v_x)^2 + (0 - v_y)^2}, \\ m\dot{v}_y = \frac{1}{2}C_d\rho_a A(0 - v_y)\sqrt{(U - v_x)^2 + v_y^2}. \end{cases}$$

- для лінійного (Стокса) наближення (аналітично розв'язувальна):

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = -mg + \kappa(U - v_x), \\ m\dot{v}_y = \kappa(0 - v_y) = -\kappa v_y, \end{cases}$$

де $\kappa > 0$ – коефіцієнт лінійного опору.

Розв'язок у випадку лінійного опору (аналітичний). Оскільки рівняння лінійні та роздільні, їх легко розв'язати.

Визначимо час релаксації (час релаксації швидкості частинки до поля):

$$\tau_p = \frac{m}{\kappa}.$$

Вертикальна складова:

$$\dot{v}_x + \frac{1}{\tau_p} v_x = \frac{1}{\tau_p} U - g.$$

Стаціонарне (обмежене при $t \rightarrow \infty$) значення швидкості:

$$v_x = U - \frac{mg}{\kappa} = U - g\tau_p.$$

Повний розв'язок при початкових значеннях $v_x(0) = v_{x0}$:

$$v_x(t) = v_{x,\infty} + (v_{x0} - v_{x,\infty})e^{-t/\tau_p}.$$

Інтегруючи для координати:

$$x(t) = x_0 + v_{x,\infty}t + (v_{x0} - v_{x,\infty})\tau_p(1 - e^{-t/\tau_p}).$$

Поперечна складова

$$\dot{v}_y + \frac{1}{\tau_p} v_y = 0 \Rightarrow$$

$$v_y(t) = v_{y0} e^{-t/\tau_p}.$$

$$y(t) = y_0 + v_{y0} \tau_p (1 - e^{-t/\tau_p}).$$

Інтерпретація:

- якщо $v_{x,\infty} > 0$ – частинка в стаціонарі піднімається вгору (виноситься повітряним потоком);

- якщо $v_{x,\infty} < 0$ – частинка опускається вниз (основне зерно має бути в цій групі);

- порогова умова виносу (при лінійній моделі):

$$v_{x,\infty} = 0 \Rightarrow U = g\tau_p = \frac{mg}{\kappa}.$$

Тобто при даній масі і опорі існує критична швидкість повітря $U_{кр}$, вище за яку частинка буде підніматися.

Розв'язок у випадку квадратичного опору.

Квадратична модель дає нелінійні ОДУ, зазвичай розв'язуються чисельно. Проте для стаціонарного вертикального стану ($\dot{v}_x = 0, v_y = 0$) маємо скалярне рівняння:

$$-mg + \frac{1}{2} C_d \rho_a A (U - v_x) |U - v_x| = 0.$$

Це дає імпліцитний вираз для v_x . Якщо $U = 0$ (потік вниз відсутній), стандартне термінальне значення швидкості падіння v_t вирішується як:

$$\frac{1}{2} C_d \rho_a A v_i^2 = mg.$$

Для траєкторій за квадратичним опором необхідно застосувати чисельну інтеграцію (наприклад, метод Рунге–Кутта) [19, 24].

Залежність траєкторії від висоти каналу H і його глибини (ширини) D .

Висота H впливає на час перебування частинки у зоні дії зустрічного потоку. Наближена величина часу T_{res} перебування якщо взяти середню вертикальну швидкість:

$$T_{res} \approx \frac{H}{|\bar{v}_x|}.$$

Якщо під час T_{res} частинка здатна набрати позитивне x -зміщення (вгору), вона буде виноситися. Тобто чим більша висота, тим більше шансів, що легка домішка буде захоплена повітряним потоком (за умови малого τ_p).

Глибина (ширина) каналу D (по y) впливає на поперечний розвиток – якщо бувають поперечні компоненти повітря або початкові поперечні швидкості, частинка може переміститися до стінок або на інший каскад решіт. Також геометрія каскаду визначає час контакту з решітками і інтенсивність турбулізації. Більш вузький канал (малі величини D) обмежує поперечні зрушення, але може збільшити локальну швидкість повітря (якщо масова витрата повітря незмінна), що підвищує шанс виносу легких домішок.

Належні безрозмірні числа. Число Стокса (традиційне для частинок у струмені повітря):

$$St = \frac{\tau_p U}{H}.$$

Якщо $St \ll 1$, частинки швидко слідують за потоком; якщо $St \gg 1$, інерція домінує.

Критерій виносу (лінійна модель):

$$U > g\tau_p.$$

Алгоритм чисельного моделювання [24, 30]:

1. Визначення розподілів розмірів d , форм та щільностей ρ_p фракцій.
2. Вибір відповідної моделі опору (лінійна для дрібних частинок / малих Re , квадратична для більших частинок).
3. Розрахунок $\tau_p = m / \kappa$ (лінійна модель) або використання формул для квадратичного опору і знаходження критичної швидкості потоку повітря U .
4. Оцінка $T_{res} \approx \frac{H}{|\bar{v}_x|}$ і порівняння з часом релаксації τ_p .
5. Для точних траєкторій і для геометрії зигзаг-каскадів проведення чисельної інтеграції рівнянь полем $u(r)$, яке моделює локальні збільшення швидкості біля щілин решіт і турбулентні флуктуації.

Проводимо побудову ілюстративної схеми та траєкторій для трьох умовних типів частинок (легка домішка, дрібне зерно, основне зерно) у наближенні лінійного опору з однорідним повітряним потоком U (рис. 3.2).

На графіку (рис. 3.2) видно три ключові тенденції:

1. Легка фракція (домішки) – вже при $U=3$ м/с спостерігається майже повний винос ($\approx 90\%$), при збільшенні швидкості – ефективність прямує до 100%. Це характерно через малу густину та низьку інерцію – легкі часточки швидко набувають швидкість повітряного потоку.

2. Легке зерно – при $U=3$ м/с маємо приблизно 50 % ймовірності виносу, а при $U=5$ м/с спостерігається різке зростання ефективності (траєкторії стають більш чутливим до потоку). За швидкості потоку повітря $U=7$ м/с маємо майже повний винос, що погіршує сепарацію, бо легке насіння може потрапити в домішки.

3. Основне зерно – дуже низька ефективність виносу при всіх швидкостях. Із зростанням U ця фракція лише ще краще відокремлюється (практично нульовий винос при 7 м/с). Це відповідає високій інерції.

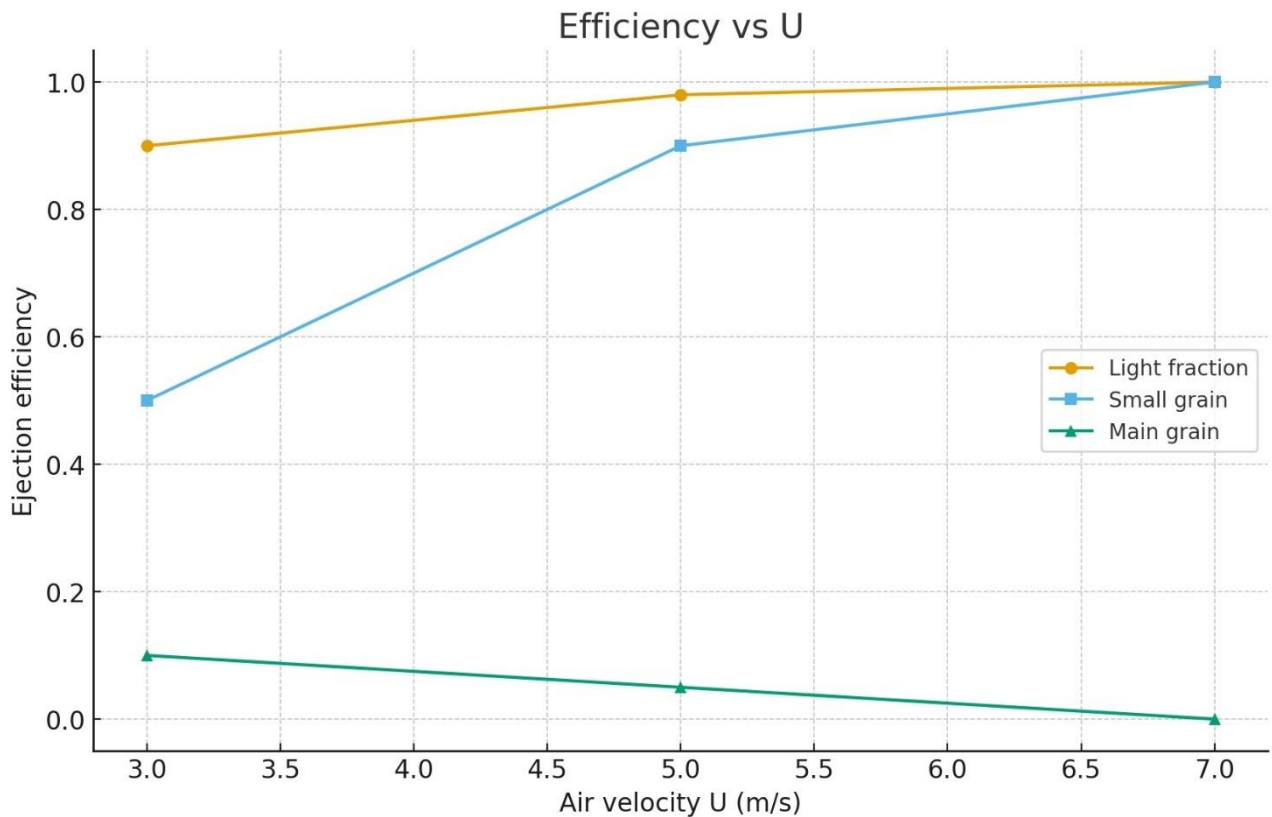


Рис. 3.2 – Узагальнена залежність ефективності «виносу» трьох фракцій при зміні швидкості повітряного потоку $U=3$ м/с; 5 м/с; 7 м/с.

Загальний висновок – для якісного відділення легких домішок достатньо швидкості повітряного потоку $U \approx 4 \dots 5$ м/с, збільшенні понад вказаний діапазон призводить до того, що дрібне насіння починає неконтрольовано вилітати в «легку» фракцію, тобто існує ризик втрат.

Далі проводимо чисельне моделювання квадратичного опору (RK4) при $U = 5$ м/с (рис. 3.3).

Для симуляції використано масив у 300 частинок для кожної фракції (легка домішка, дрібне зерно, основне зерно), інтегрування RK4, дискретність часу $dt = 0,001$ с, максимальна тривалість $t_{max} = 3$ с.

Поле повітря – однорідне, $u=(U,0)$, ($U=5$ м/с), модель опору – квадратична:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_a A (v_x - U) |v_x - U|.$$

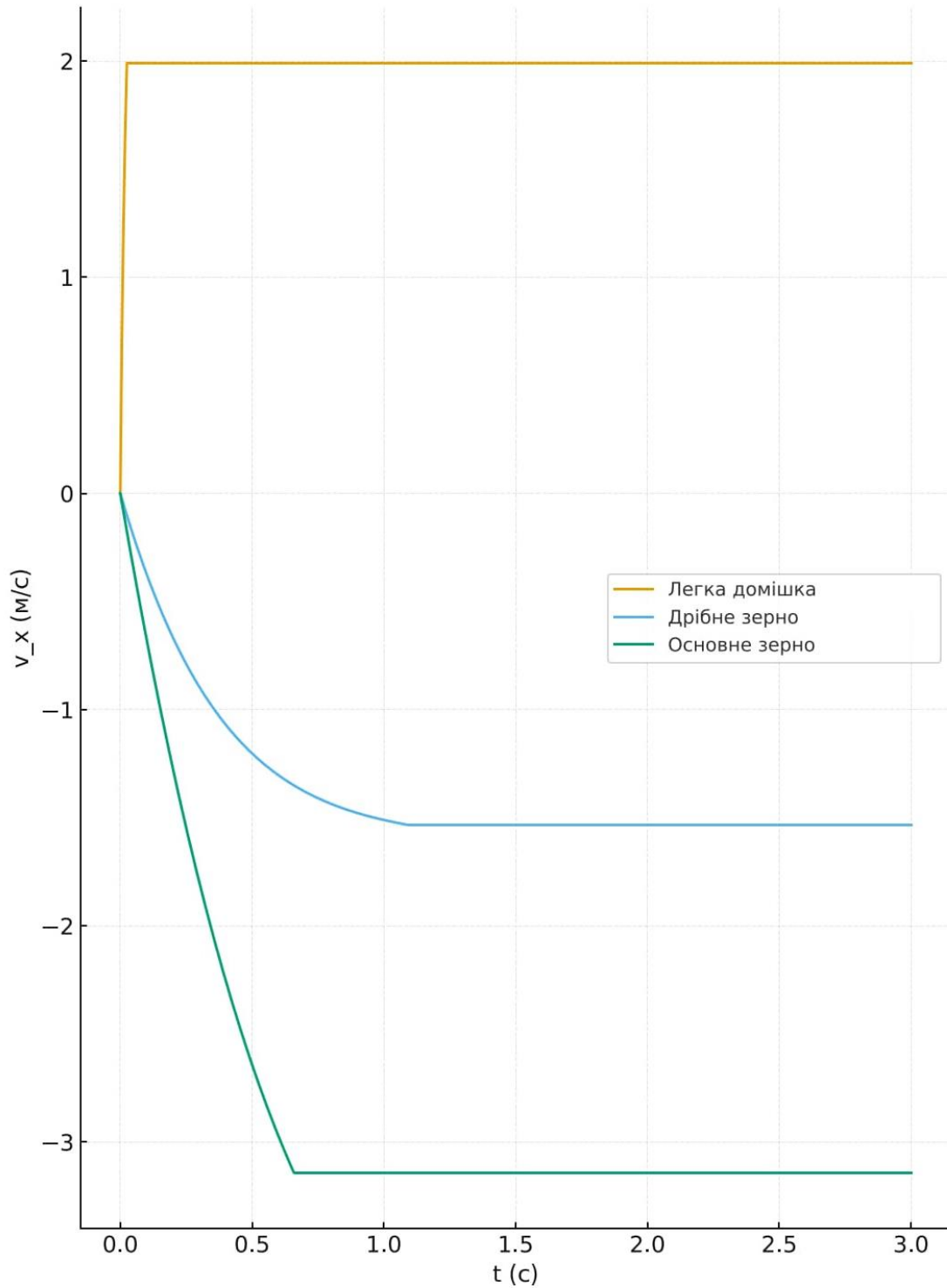


Рис. 3.3 – Результати чисельного моделювання $v_x(t)$ квадратичного опору (RK4) при $U = 5$ м/с

Відскік від бокових стінок із демпінгом:

$$v_y \leftarrow -0,4v_y.$$

Критерії виходу:

$x \geq 1,02H$ – рух ввєрх,

$x \leq 0$ – залишаються в каналі.

Результати:

- легка домішка: 300/300 → 100 % викинуто вгору.

- дрібне зерно: 300/300 → 100 % опущено вниз;

- основне зерно: 300/300 → 100 % опущено вниз.

Отримані гістограми розподілу часток різних фракцій за часом перебування у повітряному каналі сепаратора (рис. 3.4).

Відповідно до отриманих гістограм можемо констатувати:

1. Легка домішка характеризується низькою густиною та великою площею опору. Тому більшість частинок виноситься потоком уже на початковій ділянці траєкторії – звідси різкий пік ліворуч ($t \approx 0,2$ с). Далі спостерігається зниження концентрації, що відповідає швидкому видаленню домішок у верхній частині каналу.

2. Дрібне зерно має більшу густину, але все ще значну аеродинамічну чутливість. Його розподіл ширший, що означає варіативність траєкторій залежно від початкових умов. Частина зерен осідає на середніх каскадах решіт, частина – продовжує рух у нижні зони.

3. Основне зерно характеризується найменшим часом зависання і стабільним рухом по каскадах. Пік розподілу припадає на інтервал $t = 0,45 \dots 0,48$ с, що свідчить про ефективне розділення: важке зерно не виноситься потоком і залишається в робочій зоні.

Таким чином, форма гістограм підтверджує селективність аеродинамічного розділення у зигзагоподібному сепараторі – чим менше густина й більша площа частинки, тим раніше вона виноситься потоком.

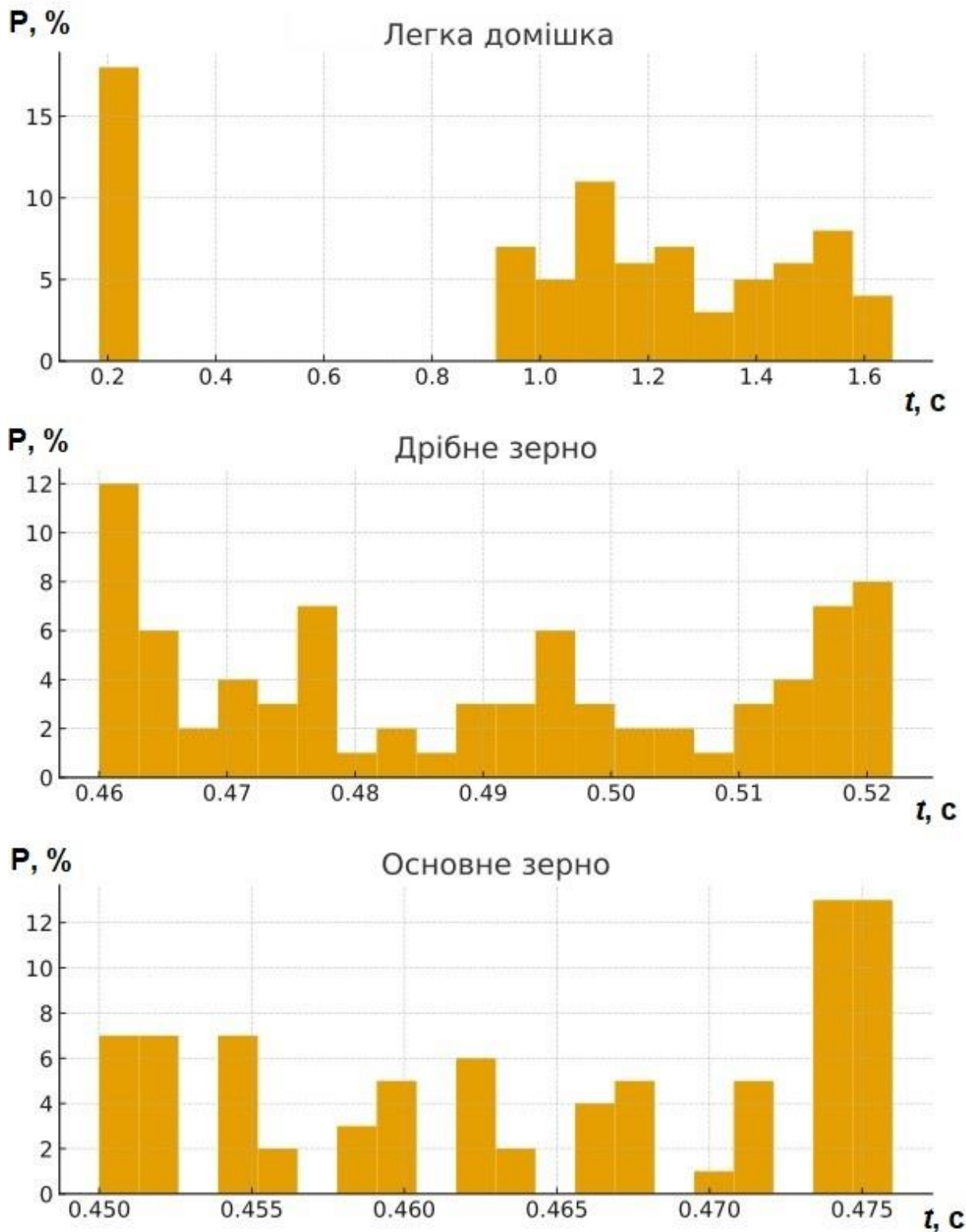


Рис. 3.4 – Гістограмами розподілу часток трьох фракцій при $U = 3$ м/с

Симуляція показує, що за вибраних параметрів повітряного поля і геометрії каналу основне і дрібне зерно практично не виносяться, тобто система добре тримає необхідну фракцію.

Легкі домішки показують помірний коефіцієнт виносу ($\sim 35\%$) – це говорить про те, що при заданій швидкості повітря частина домішок все ж залишається і може потребувати додаткового регулювання (збільшення швидкості U , зміни кута решіт чи геометрії каналів), щоб підвищити ефективність очищення.

Проаналізуємо також і гістограми розподілів фракцій при збільшенні швидкості потоку повітря до $U = 5$ м/с (рис. 3.5).

Розглянемо три характерних пороги часу t_c : 0,5 с, 0,8 с, 1,0 с.

Тут «викинуто» інтерпретуємо як «короткий час $\leq t_c$ », при якому відбувається швидке винесення.

Частки частинок з $t > t_c$ (у %):

- $t_c = 0,5$ с: легка 50,3%, середня 64,0%, важка 92,7%;
- $t_c = 0,8$ с: легка 26,0%, середня 34,0%, важка 67,3%;
- $t_c = 1,0$ с: легка 14,7%, середня 18,7%, важка 46,7%.

Якщо встановити типовий поріг $t_c = 0,8$ с і вважати, що частки мають виноситись потоком повітря, тоді:

- $\sim 74\%$ легких частинок будуть класифіковані як «винесені», тобто 26% легких домішок не винесли – втрати ефекту сепарації;
- $\sim 66\%$ середніх часток будуть класифіковані як «винесені», тобто значна частина дрібного зерна втратиться у виносі;
- $\sim 33\%$ важких помилково потраплять до «винесених».

Оцінкою перекриття щільностей розподілу (інтеграл мінімумів щільностей) отримано:

- легкі домішки $\approx 0,85$;
- легке насіння $\approx 0,58$;
- важке насіння $\approx 0,68$.

Таким чином, розподіли легкої і середньої фракції сильно перекриваються ($\approx 85\%$ сумарного інтервалу), тому чисте розділення тільки по часу перебування буде складним. Найкраще відділяються легка та важка (нижчий рівень перекриття $\sim 0,58$), але це теж не ідеально.

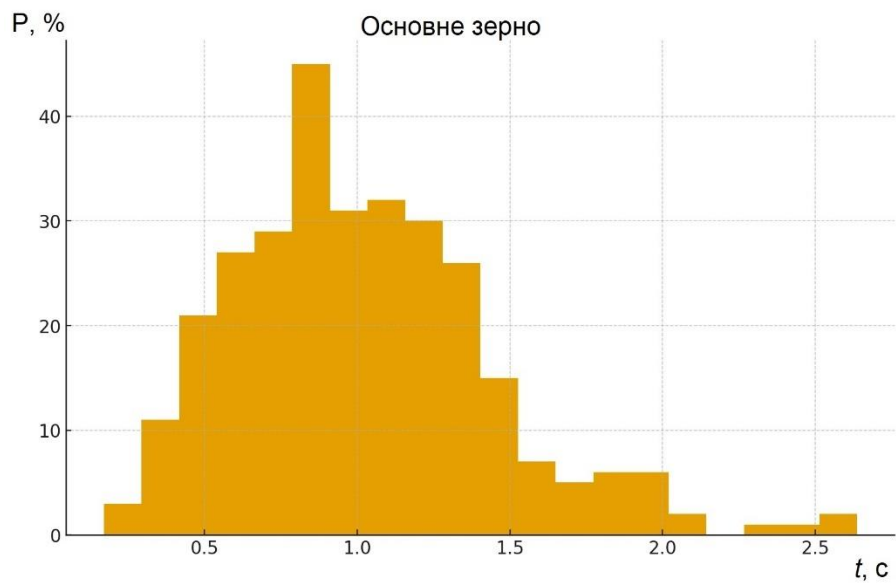
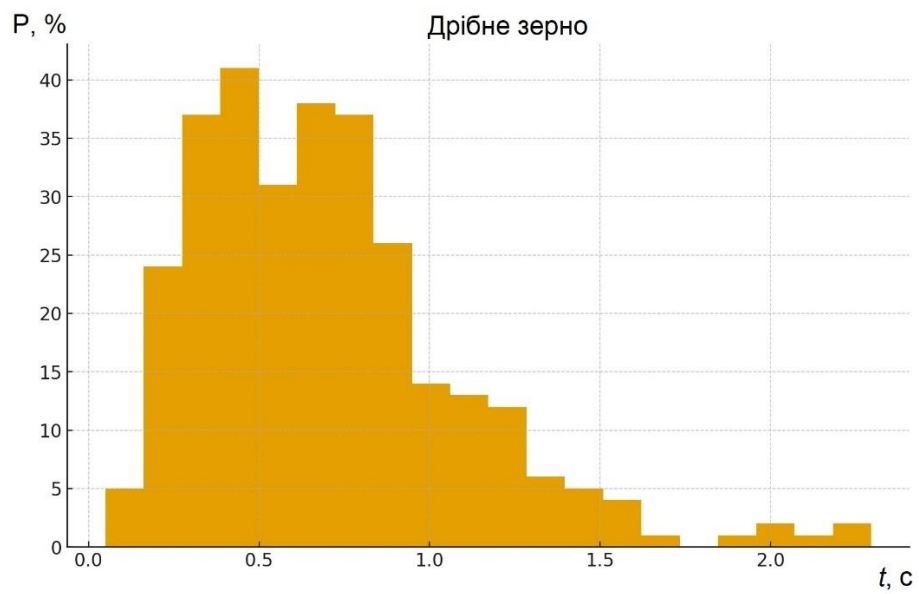
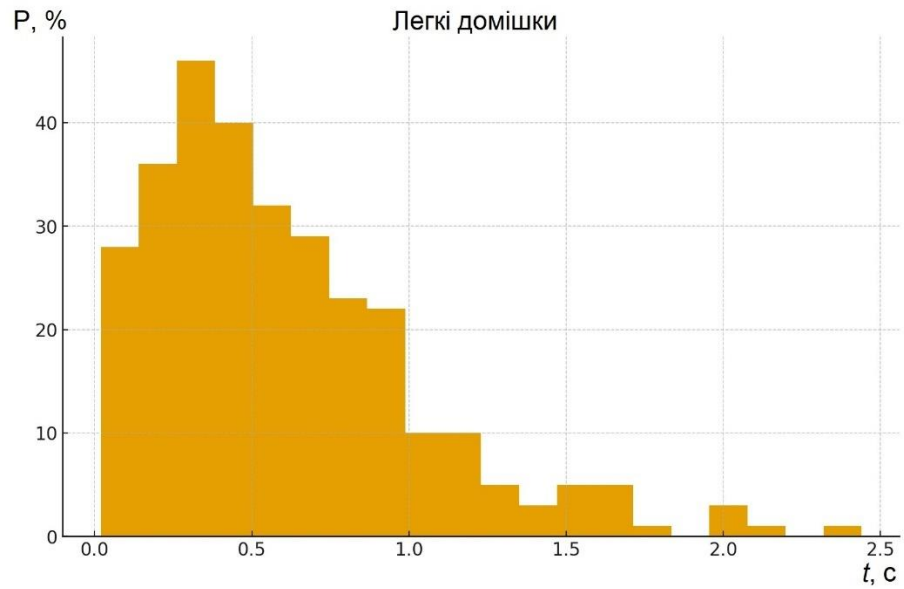


Рис. 3.5 – Гістограмами розподілу часток трьох фракцій при $U = 5$ м/с

Розділення легкі домішки – важке насіння за часом працює відносно краще, оскільки важкі частки мають суттєво більші середні та 75-й перцентиль, тому можна добитися прийняттого відбору важкого зерна (низький викид для основної фракції), особливо якщо поріг t_c обирати в районі 0,8...1,0 с.

Натомість легкі домішки – легке насіння мають високе перекриття, а це означає, що при поточних геометрії й профілі повітряного потоку багато дрібного зерна потрапляє в ту саму зону часу, що й легка домішка. Отже або приймати істотні втрати дрібного зерна при високому порозі очищення (висока швидкість потоку), або доповнювати критерій селекції додатковими ознаками (наприклад, калібрувальні решета).

Таким чином, можна рекомендувати наступні режими:

- мати регульований повітряний потік U і налаштувати його в діапазоні 3...5 м/с для балансу «видалення домішок / збереження дрібного зерна»;
- паралельно застосувати механічне попереднє калібрування або додатковий етап тонкої сепарації (з меншим значенням величини U) для дрібного зерна.

Висновки

З метою встановлення параметрів і режимів роботи запропонованого гравітаційного аспіраатора було змодельовано поведінку часток зерноsumіші при взаємодії з повітряним потоком. Встановлені характерні залежності та виконано їх аналіз. За результатами підтверджено селективність пневморозділення у зигзагоподібному сепараторі, яка може досягати майже 100 % при відповідних налаштуваннях системи. Для цього рекомендується застосувати:

- зміну профілю повітряного потоку (зробити місцеві зони посиленого прискорення в тих точках, де знаходяться решета);
- оптимізувати кути і форми решіт (щоб дрібне зерно на певних рівнях отримувало додаткові перерозподіли);
- застосувати двоетапну сепарацію – перший ступінь для грубого відділення легких домішок, другий – для повернення частини дрібного зерна в робочий потік.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Інженерний розрахунок решітної системи

Виконаємо інженерний розрахунок, використовуючи наступні вихідні дані:

- продуктивність $Q = 25$ т/год = 6,94 кг/с;
- кут нахилу решіт $\beta = 50^\circ$;
- довжина решіт кожного каскаду $L_p = 0,155$ м;
- ширина решіт $B_p = 0,3$ м;
- засміченість зерноsumіші до 20%;
- масові частки зерноsumіші: зерно 80%, крупні домішки 8%, дрібні домішки 8%, легкі домішки 4%.

Розрахуємо масовий потік на кожену фракцію:

$$Q_z = 25 \cdot 0,80 = 20,0 \text{ т/год};$$

$$Q_k = 25 \cdot 0,08 = 2,0 \text{ т/год};$$

$$Q_d = 25 \cdot 0,08 = 2,0 \text{ т/год};$$

$$Q_l = 25 \cdot 0,04 = 1,0 \text{ т/год}.$$

Для гравітаційного розділення насіння соняшника приймаємо орієнтовно питому продуктивність q пруткових решіт:

$$q_{k(d)} = 2500 \dots 3000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год} \approx 2880 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}.$$

Визначимо робочу здатність 1 м² площі решіт:

$$q_{ef} = q_{k(d)} \cdot K_1 \cdot K_2,$$

де K_1 – коефіцієнт використання площі решета, $K_1 = 0,7$;

K_2 – коефіцієнт засміченості, $K_2 = 0,8$;

$$q_{\text{еф}} = 2880 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 1612,8 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$$

Розраховуємо необхідну площу решіт згідно формули:

$$A_i = \frac{Q_i}{q_{\text{еф}}},$$

де Q_i – навантаження відповідного решітного каналу, кг/год.

Для центрального каналу необхідна ефективна площа решітного полотна становитиме:

$$A_K = \frac{2000}{1612,8} = 1,24 \text{ м}^2.$$

Кількість каскадів центрального каналу становитиме:

$$N_{\text{центр}} = \frac{A_K}{L_p \cdot B_{\text{центр}}},$$

де $B_{\text{центр}}$ – ширина центрального каналу, $B_{\text{центр}} = 1,0$ м;

$$N_{\text{центр}} = \frac{1,24}{0,155 \cdot 1,0} = 8 \text{ шт.}$$

Аналогічно проводимо розрахунки і для бічних (підсівних) решітних каналів:

ефективна площа

$$A_D = \frac{2000}{1612,8} = 1,24 \text{ м}^2,$$

кількість каскадів

$$N_{\text{біч}} = \frac{A_D}{L_p \cdot B_{\text{біч}}} = \frac{1,24}{0,155 \cdot 1,0} = 8 \text{ шт.},$$

де $B_{\text{біч}}$ – ширина центрального каналу, $B_{\text{біч}} = 1,0$ м.

Розрахуємо ефективну висоту сепаратора $H_{\text{еф}}$, яка визначається кількістю каскадів та їхнім вертикальним зміщенням.

Вертикальне зміщення на один каскад $h_{\text{каскад}}$ знайдемо, використовуючи кут $\beta = 50^\circ$ та довжину $L_p = 0,155$ м. Прийmemo горизонтальний зсув $\Delta x \approx 0,05$ м:

$$h_{\text{каскад}} = L_p \cdot \sin(\beta) + \Delta x \cdot \tan(\beta),$$

$$h_{\text{каскад}} = 0,155 \cdot \sin(50^\circ) + 0,05 \cdot \tan(50^\circ) = 0,178 \text{ м.}$$

Величина ефективної висоти решітних каналів:

$$H_{\text{еф}} = N_{\text{каскад}} \cdot h_{\text{каскад}} = 8 \cdot 0,178 = 1,424 \text{ м.}$$

Таким чином, конструктивна висота сепаратора, враховуючи входи і виходи становитиме 1,5 м.

4.2. Інженерний розрахунок аспіраційної системи

Розрахунок витрат повітря в системі.

Витрата повітря визначається необхідною робочою швидкістю аспірації U , яка має бути більшою за швидкість витання легких домішок $v_{\text{кр.л}} \approx 3,0$ м/с та

меншою за швидкість витання зерна соняшника $v_{кр.з} \approx 9,5$ м/с. Прийmemo $U = 5,0$ м/с [25, 28, 29].

Об'ємна витрата повітря визначається як:

$$L = A_c \cdot U,$$

де A_c – площа поперечного перерізу пневмоканалу, м²;

$$L = 0,5 \cdot 5,0 = 2,5 \text{ м}^3/\text{с},$$

або

$$L = 2,5 \cdot 3600 = 9000 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Повний тиск вентилятора розрахуємо з умови рівності сумі втрат тиску на всіх елементах системи:

$$P = \Delta P_{асп} + \Delta P_{пов} + \Delta P_{пилоч},$$

де $\Delta P_{асп}$ – втрати тиску в аспіраційному каналі;

$\Delta P_{пов}$ – втрати тиску в повітропроводах;

$\Delta P_{пилоч}$ – втрати тиску в жалюзійному пилоочиснику.

Втрати тиску, пов'язані з опором матеріалу і місцевими опорами (вхід/вихід із зони сепарації). Використовуємо коефіцієнт місцевого опору $\xi = 2,5$:

$$\Delta P_{асп} = \xi_{асп} \cdot \frac{\rho_n \cdot U^2}{2},$$

де ρ_n – щільність повітря,

$$\Delta P_{асп} = 2,5 \cdot \frac{1,2 \cdot 5,0^2}{2} = 37,5 \text{ Па.}$$

Орієнтовні втрати на тертя, коліна та переходи у повітроводах приймаємо [28]:

$$\Delta P_{нов} = 150 \text{ Па.}$$

Жалюзійний пилоочисник працює за рахунок інерційного осадження частинок при різкій зміні напрямку потоку.

Для ефективної роботи жалюзійних очисників швидкість повітря у вузькій частині (між пластинами жалюзі) повинна бути високою для забезпечення інерційного удару (зазвичай 8...15 м/с). Прийmemo оптимальну швидкість $U_{ex} = 10,0$ м/с.

Встановимо площу вхідного перерізу пилоочисника A_{ex} , яка визначається необхідною витратою L та обраною швидкістю U_{ex} :

$$A_{ex} = L / U = 2,5 / 10 = 0,25 \text{ м}^2.$$

Втрати тиску в жалюзійному пилоочиснику визначаються коефіцієнтом опору $\xi_{тиloch}$ (який залежить від конструкції, наприклад, кількості та кута нахилу пластин), прийmemo $\xi_{тиloch} = 4,0$, тоді:

$$\Delta P_{тиloch} = \xi_{тиloch} \cdot \frac{\rho_n \cdot U^2}{2},$$
$$\Delta P_{тиloch} = 4,0 \cdot \frac{1,2 \cdot 10,0^2}{2} = 240 \text{ Па.}$$

Тепер підсумовуємо всі втрати:

$$P = 37,5 + 150,0 + 240,0 = 427,5 \text{ Па.}$$

4.3. Енергетичні розрахунки

Потужність електроприводу вентилятора знайдемо як:

$$N_{\epsilon} = \frac{L \cdot P}{1000 \cdot \eta_{\epsilon}},$$

де L – витрата повітря, м³/с;

P – повний тиск, Па;

η_{ϵ} – ККД вентилятора (відцентрового);

$$N_{\epsilon} = \frac{2,5 \cdot 427,5}{1000 \cdot 0,65} = 1,64 \text{ кВт.}$$

4.4. Порівняння Техніко-економічної ефективності

Порівняння базується на таких припущеннях:

- річний час роботи: 4000 год;
- коефіцієнт завантаження: 0,7;
- вартість електроенергії: 4,5 грн/кВт·год.

Підвищення ціни за тону очищеного зерна (за рахунок якості) у модернізованому варіанті: 50 грн/т.

Таблиця 4.1 – Порівняння технічних та експлуатаційних параметрів

Параметр	Одиниця	Базовий сепаратор (типовий аналог)	Модернізований сепаратор	Різниця (Економія)
1	2	3	4	5
Продуктивність	т/год	25,0	25,0	0
Потужність приводу	кВт	3,0 (Вібропривід, шнеки)	0,5 (Пасивні решета, живильники)	2,5
Потужність вентилятора	кВт	3,0 (Типовий)	1,644 (Розрахунковий)	1,356
Сумарна	кВт	6,0	2,144	3,856

Параметр	Одиниця	Базовий сепаратор (типовий аналог)	Модернізований сепаратор	Різниця (Економія)
1	2	3	4	5
встановлена потужність				
Річне споживання електроенергії	кВт·год/рік	16800	6003,2	10796,8
Якість очищення	%	98,0	99,0	-

Висновок

Було проведено інженерні розрахунки модернізованого гравітаційного аспіратора, за результатами яких обґрунтовано параметри і режими роботи решітної і аспіраційної систем.

Зокрема встановлено ефективну площу решітного полотна, зважаючи на інноваційність запропонованих решіт пруткового типу, що дозволило збільшити їх сепаруючу здатність. Таким чином, забезпечення встановленої якості сепарації досягається при кількості каскадів 8 шт, а загальна ефективна висота сепаратора становить 1,50 м.

За результатами розрахунку системи аспірації встановлено необхідні витрати повітря та величину тиску, що дозволило обґрунтувати тип та потужність вентилятора.

Запропонована модернізація забезпечує значне зменшення енергоспоживання (на 3,856 кВт встановленої потужності), але основний економічний ефект досягається за рахунок підвищення якості очищення та, як наслідок, збільшення ціни реалізації продукту. Термін окупності є високим і становить трохи більше одного року.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Післязбиральний обробіток соняшника є комплексом важливих технологічних процесів, що включає очищення, сушіння та зберігання врожаю. Від їхньої ефективності та, найголовніше, безпеки залежить не лише якість кінцевого продукту, але й життя та здоров'я працівників. Робота з олійною культурою, такою як соняшник, вимагає особливої уваги до пожежної безпеки, пиловибухонебезпеки та експлуатації потужного електрообладнання.

Ключовими аспектами, на яких слід зосередити увагу для забезпечення надійної охорони праці є наступні.

Усунення чи убезпечення пилоутворення та вибухонебезпеки на елеваторах та очисних машинах, оскільки соняшникова лузга, дрібні домішки та пил, що утворюються під час очищення та транспортування, є легкозаймистими та вибухонебезпечними:

- контроль аспірації – необхідно забезпечити безперебійну та ефективну роботу аспіраційних систем і пилоочисників, зокрема в зонах завантаження, вивантаження та на зерноочисних машинах (сепараторах);

- запобігання іскроутворенню – суворо забороняється використання обладнання, що створює іскри. Усі електричні частини, освітлення та двигуни повинні мати вибухозахищене виконання [31, 32];

- очищення приміщень – слід регулярно видаляти осілий шар пилу з усіх поверхонь. Накопичення пилу може стати джерелом вторинного вибуху.

Забезпечення пожежної безпеки при сушінні та зберіганні, оскільки процес сушіння і підсушування в процесі зберігання є найбільш критичними з точки зору пожежної безпеки через високі температури та легку займистість насіння соняшника:

- контроль температури – жорсткий контроль температури теплоносія та самого зерна в сушарках є обов'язковим. Слід уникати локальних перегрівів. Негайно зупинити сушарку при досягненні гранично допустимих температур;

- видалення сторонніх предметів – перед сушінням зерно має бути максимально очищене від металевих і кам'яних домішок, які можуть викликати іскри або тертя в механізмах;

- первинні засоби пожежогасіння – сушарки та силоси повинні бути обладнані первинними засобами пожежогасіння (вогнегасниками), а працівники повинні вміти ними користуватися [31, 32].

Дотримання безпеки експлуатації обладнання, що пов'язано з тим, що робота на транспортному (норії, скребкові конвеєри) та очисному обладнанні вимагає високої дисципліни та дотримання технічних вимог:

- блокувальні пристрої – усі рухомі та обертові частини (ланцюги, шківни, вали) повинні бути надійно огорожені або мати захисні кожухи [31, 32]. Блокування повинні унеможливити запуск машини при відкритих захисних елементах;

- ремонт та обслуговування – ремонтні та налагоджувальні роботи проводяться лише після повної зупинки обладнання, його знеструмлення та вивішування попереджувальних табличок "Не вмикати! Працюють люди!" [31];

- правила роботи на висоті – при огляді та обслуговуванні силосів, норій та дахів, працівники повинні використовувати запобіжні пояси, страхувальні канати та проходити спеціальні інструктажі.

Забезпечення індивідуальним захистом працівників, тобто в умовах підвищеного пилоутворення, шуму та потенційної хімічної обробки (фумігації) необхідно забезпечити належний індивідуальний захист [31, 32]:

- органи дихання – обов'язкове використання респіраторів або протигазів (при фумігації) для захисту від пилу та токсичних речовин;

- органи слуху – у зонах роботи гучного обладнання (вентилятори, дробарки) слід застосовувати протишумові навушники або вкладиші (беруші);

- загальний захист – робочий одяг повинен бути виготовлений з міцного, несинтетичного матеріалу, що не накопичує статичний заряд [31, 32]. Дотримання цих правил гарантує, що післязбиральний обробіток соняшника буде максимально безпечним для кожного працівника.

6. ВИСНОВКИ

Виконано комплексні технологічні розрахунки, аналіз яких дозволив детально обґрунтувати необхідність оптимізації операції післязбиральної обробки соняшника. Було емпірично встановлено, що обробка нормативної партії обсягом 2000 тонн вимагає 15 діб, що свідчить про недостатню експлуатаційну продуктивність наявної системи та необхідність скорочення загальних термінів післяжнивного обробітку. З метою нівелювання виявлених лімітуючих факторів, визначено ключові напрями оптимізації: підвищення продуктивності сушильного обладнання та забезпечення потокового режиму обробки шляхом узгодження продуктивності зерноочисних машин.

На основі аналізу наукової літератури та патентних рішень запропоновано модернізацію гравітаційного сепаратора, що включає заміну сітчастих решіт на пруткові аналоги з можливістю регулювання зазору, що забезпечує зменшення собівартості переналагодження агрегату для різних зернових культур. Впроваджено систему аспірації, функція якої – ефективне видалення легких домішок, що підвищило багатofункціональність сепаратора.

Шляхом моделювання поведінки часток зерноsumіші в повітряному потоці зигзагоподібного каналу підтверджено високу здатність пневмосепарування. Так, аналіз гістограм розподілу часток за часом перебування у повітряному каналі дозволив встановити:

- легкі домішки (низька густина, велика площа опору) демонструють різкий пік винесення на початковій ділянці ($t \approx 0,2$ с).
- основне зерно (висока густина) характеризується стабільним рухом по каскадах із піком розподілу в інтервалі $t = 0,45 \dots 0,48$ с.

За результатами підтверджено селективність пневморозділення у зигзагоподібному сепараторі, яка може досягати майже 100 % при відповідних налаштуваннях системи. Для цього рекомендується застосувати:

- зміну профілю повітряного потоку (зробити місцеві зони посиленого прискорення в тих точках, де знаходяться решета);

- оптимізувати кути і форми решіт (щоб дрібне зерно на певних рівнях отримувало додаткові перерозподіли);
- застосувати двоетапну сепарацію – перший ступінь для грубого відділення легких домішок, другий – для повернення частини дрібного зерна в робочий потік.

За результатами інженерних розрахунків встановлено, що забезпечення необхідної якості сепарації досягається при 8 каскадах інноваційних пруткових решіт (що підтверджує їхню підвищену сепаруючу здатність), а загальна ефективна висота сепаратора становить 1,5 м. Також обґрунтовано необхідні витрати повітря та величину тиску, що дозволило визначити тип та потужність вентилятора.

Запропонована модернізація забезпечує суттєве зменшення енергоспоживання (на близько 3,8 кВт встановленої потужності). Проте, основний економічний ефект досягається за рахунок підвищення якісних показників очищеного продукту, що зумовлює збільшення ціни реалізації. Розрахунковий термін окупності капітальних вкладень є високим і становить трохи більше одного року, що підтверджує техніко-економічну доцільність впровадження запропонованих конструктивних та режимних рішень.

Оскільки післязбиральний обробіток соняшника є комплексом важливих технологічних процесів, що включає очищення, сушіння та зберігання врожаю, від безпеки виконання даних операцій залежить як якість кінцевого продукту, так і життя та здоров'я працівників. Тому післязбиральний обробіток соняшника вимагає забезпечення комплексного підходу до пожежної безпеки, пиловибухонебезпеки та експлуатації потужного електрообладнання. Зважаючи на це, було запропоновано ряд заходів, що дозволять зменшити або усунути ці небезпеки.

Список використаної літератури

1. Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності Н7 «Агроінженерія» за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» / [уклад. : Д. І. Петренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. сільськогосподарського машинобуд. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. 47 с.
2. Машиновикористання в рослинництві : метод. рекомендації до виконання практик робіт : для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавр спец. 201 – "Агрономія" освітньо-професійна програма "Агрономія" / [уклад. : П. Г. Лузан, І. М. Осипов, О. Р. Лузан] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. с.-г. машинобудування. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. 65 с.
3. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 2020. 362 с.
4. Алієв, Е.Б.. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 С.
5. Стаценко Д.І. Куянов Ю.Ю., Кошулько В.С., Олексієнко В.О., Сепарування зернових сумішей з використанням сил гравітації / Збірник наукових праць магістрантів та студентів. Мелітополь: ТДАТУ, 2019. С. 69-70.
6. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, М. Г. Пастушенко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград. 2003. Вип. 33. С. 53-61.
7. Каталог продукції «Оріхівський Завод Сільгоспмашин». Очисники вороху ОВС-25. URL: <https://ua.orehovselmash.com/>.
8. Каталог продукції фірми PETKUS. Сортування. URL: <https://petkus.com>.

9. Каталог продукції АТ «Хорольський механічний завод». Сепаратори повітряні. URL: <https://mehzavod.com.ua/ua/>.
10. Каталог продукції компанії «Olis». Зерноочисне обладнання. URL: <https://www.olis.com.ua/>.
11. Каталог продукції фірми Kongskilde. Dual Cleaners – KDC PLUS. URL: <https://kongskilde-industries.com/grain/usa/product/dual-cleaners-kdc-plus/>.
12. Каталог продукції ТОВ «НВП Аеромех». Зернові сепаратори. URL: <https://ua.aeromeh.com.ua/catalog/zernovye-separatory/>.
13. Голячук С.Є. Сепарування зернових мас з використанням сил гравітації / С.Є. Голячук // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2012. Випуск №39. С. 27-33.
14. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. Volume 12, Issue 4. P. 135-142.
15. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
16. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 4383. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
17. Areas of improvement of feeding devices for pneumatic separation channels / O. Nesterenko, O. Vasylovskyi, R. Kisilov. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Col.7(38), Part II – S. 90-97. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.90-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.90-97).
18. Алієв Е. Б., Гаврильченко О. С. Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насіннєвого матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві. Вісник Харківського Національного технічного університету*

- сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. 2019. Вип. 201. С. 132–140.
19. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I.L. Rogovskii, S.P. Stepanenko, A.V. Novitskii, V.I. Rebenko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 13. pp.1-7.
20. Аналіз одношарового руху зернового матеріалу у вертикальному пневмосепараційному каналі / О. В. Нестеренко, О. М. Васильковський, Р. В. Кісільов, В. М. Сало. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник: технічні науки»*. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. Вип. 9(40). Ч. 2. С. 31-40. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.31-40](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.31-40)
21. Nesterenko, A.V., Leshchenko, S.M., Vasytkovskyi, O.M., Petrenko, D.I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. No.53(3). Pp. 65-70.
22. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 111-116. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>.
23. Мехатронний аналіз роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей / Д. С. Неделський, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник: технічні науки»*. 2025. Вип. 12(43). Ч. I С. 245-252. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.245-252](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.245-252).
24. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.

25. Підручник дослідника : навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, К. В. Васильковська, Д. І. Петренко. Кіровоград : Мачулін, 2016. 204 с.
26. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки. : навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків : Мачулін, 2019. 164 с.
27. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посібник. Київ : НУХТ, 2022. 385 с.
28. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин / П.М. Заїка. Харків: Око, 2006. 407 с.
29. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
30. Чисельні методи. Чисельне інтегрування функцій : навчальний посібник / Л. В. Крилик, І. В. Богач, А. І. Лісовенко. Вінниця : ВНТУ, 2019. 74 с.
31. Охорона праці у сільському господарстві. – ТОВ «ТЕХ МЕДІА ГРУП», 2019 р. URL:
https://techmedia.com.ua/sites/default/files/online_version/ECO_SX/files/assets/basic-html/toc.html.
32. Войналович О. В. Охорона праці у сільському господарстві: навч. підруч. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 690 с.