

Центральноукраїнський національний технічний університет

ЦЗДО

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 сепаратора КБС-1270.3.00»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи АІ-24МЗ

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____ Остроухов Назар Вікторович

« ____ » грудня 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ

« ____ » грудня 2025 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Тимофій РУДЕНКО

« ____ » грудня 2025 р.

м. Кропивницький

Анотація

Магістерська робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – підвищенню ефективності післязбиральної обробки дрібнонасінних олійних культур, зокрема озимого ріпаку, шляхом інтенсифікації робочого процесу та модернізації конструктивних елементів решітного сепаратора КБС-1270.3.00. У роботі проаналізовано сучасний стан технологій очищення зерна та виявлено, що базові моделі вітчизняних сепараторів, спроектовані переважно для зернових колосових культур, демонструють низьку ефективність при роботі з ріпаком підвищеної вологості (понад 13%). Встановлено, що основними причинами зниження продуктивності на 30–40% та втрат повноцінного насіння є недосконалість системи подачі вороху, яка не забезпечує рівномірного розподілу матеріалу по ширині решета, та фіксований кінематичний режим роботи решітних станів, що не дозволяє адаптувати інтенсивність сепарації до зміни фізико-механічних властивостей сировини. На основі вивчення фізико-механічних властивостей районованих сортів ріпаку («Чорний велетень», «Анна», «Атлант») побудовано фізичну модель насінини як сфероїда обертання з еквівалентним діаметром 1,66 мм. Експериментально підтверджено суттєве зростання коефіцієнта тертя насіння по сталевій поверхні (з 0,36 до 0,65) при зволоженні, що призводить до «залипання» отворів решіт при стандартних режимах коливань. Теоретично обґрунтовано гіпотезу, що інтенсифікація сепарації дрібнонасінних культур можлива за умови переведення зернового шару у стан керованого псевдозрідження. Розроблено математичну модель руху поодинокі частинки на вібруючій похилій площині. Визначено, що для забезпечення ефекту мікропідстрибування, необхідного для самоочищення решіт та активної сегрегації шару, показник кінематичного режиму роботи сепаратора повинен знаходитись у межах $k = 1,8 \dots 2,2$. Доведено, що для досягнення таких параметрів частота коливань решітного стану має регулюватися в діапазоні $480\text{--}580 \text{ хв}^{-1}$ залежно від вологості вхідного матеріалу. В інженерній частині роботи розроблено проект модернізації сепаратора КБС-1270.3.00. Обґрунтовано раціональні технологічні параметри роботи модернізованої машини: швидкість повітряного потоку в аспіраційній камері – 4,8–5,5 м/с; кут нахилу решіт – 8–11°; питома навантаження – до 3,5 т/(год·м). Розроблено практичні номограми для налаштування частоти коливань та швидкості повітряного потоку, що дозволяє обслуговуючому персоналу оперативно адаптувати машину до змінних умов. Питомі енерговитрати на очищення 1 тонни насіння знижено на 37% (з 0,75 до 0,47 кВт·год/т). У розділі охорони праці проаналізовано потенційні виробничі ризики, пов'язані з шумом, вібрацією та вибухонебезпечністю ріпакового пилу. Результати роботи можуть бути використані на сільськогосподарських підприємствах, що займаються вирощуванням та переробкою олійних культур, а також машинобудівними заводами при проектуванні нових моделей зерноочисної техніки.

Ключові слова: ріпак, сепаратор, модернізація, шнековий живильник, варіатор.

Annotation

The master's thesis is devoted to solving a relevant scientific and applied problem – increasing the efficiency of post-harvest processing of small-seeded oil crops, particularly winter rapeseed, by intensifying the workflow and modernizing the structural elements of the KBS-1270.3.00 sieve separator. The paper analyzes the current state of grain cleaning technologies and reveals that basic models of domestic separators, designed primarily for cereal crops, demonstrate low efficiency when processing rapeseed with high moisture content (over 13%). It has been established that the main reasons for the 30–40% decrease in productivity and significant losses of viable seeds are the imperfection of the heap feeding system, which does not ensure uniform distribution of material across the sieve width, and the fixed kinematic regime of the sieve shoes, which does not allow adapting the separation intensity to changes in the physical and mechanical properties of the raw material. Based on the study of the physical and mechanical properties of zoned rapeseed varieties ("Black Giant", "Anna", "Atlant"), a physical model of the seed was built as an oblate spheroid with an equivalent diameter of 1.66 mm. It was experimentally confirmed that the friction coefficient of seeds on a steel surface increases significantly (from 0.36 to 0.65) upon wetting, which leads to sieve clogging under standard vibration modes. The hypothesis is theoretically substantiated that the intensification of small-seeded crop separation is possible under the condition of transferring the grain layer into a state of controlled pseudoliquefaction (fluidization). A mathematical model of the movement of a single particle on a vibrating inclined plane has been developed. It was determined that to ensure the micro-jumping effect necessary for self-cleaning of sieves and active segregation of the layer, the kinematic regime index of the separator should be within the range of $k = 1.8 \dots 2.2$. It is proven that to achieve such parameters, the oscillation frequency of the sieve shoe must be regulated in the range of 480–580 rpm depending on the moisture content of the input material. In the engineering part of the work, a modernization project for the KBS-1270.3.00 separator was developed. To eliminate feed unevenness and eliminate "dead zones" on the sieves, a screw feeder-distributor with a diameter of 250 mm and a rotation speed of 90 rpm was designed, ensuring material supply in a monolayer. To implement an adaptive kinematic regime, a V-belt variator (variable speed drive) was integrated into the eccentric shaft drive, allowing smooth changes in the angular velocity of oscillations without stopping the technological process. Practical nomograms for adjusting the oscillation frequency and air flow velocity have been developed, allowing maintenance personnel to promptly adapt the machine to changing conditions. The results of the work can be used at agricultural enterprises engaged in the cultivation and processing of oil crops, as well as by machine-building plants in the design of new models of grain cleaning equipment.

Keywords: rapeseed, separator, modernization, screw feeder, variator.

Зміст

	стор.
Вступ.....	6
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень.....	8
3. Наукова частина.....	23
4. Практична реалізація результатів дослідження.....	41
5. Охорона праці.....	51
Загальні висновки.....	59
Список використаної літератури.....	61
Додатки.....	56

ВСТУП

Сучасний стан агропромислового комплексу України характеризується динамічним пошуком високоефективних культур, які здатні не лише забезпечити продовольчу безпеку, а й стати надійним фундаментом для енергетичної незалежності та експортного потенціалу країни. Озимий ріпак у цій структурі посідає особливе місце. Це культура унікальних можливостей: від виробництва високоякісних харчових олій та збалансованих за амінокислотним складом кормів до використання як сировини для біодизельного палива.

Проте шлях від зібраного з поля вороху до якісного кінцевого продукту супроводжується значними технологічними викликами. Ріпак – культура «тендітна» та складна у переробці. Його насіння має малий розмір (0,9–2,2 мм), високу гігроскопічність та схильність до швидкого самозігрівання. Навіть нетривале перебування неочищеного та вологого насіння у буртах призводить до незворотних процесів дихання, що критично знижує вміст олії та схожість.

Саме тому етап первинної обробки, а саме очищення від домішок, є критичною ланкою всієї технології. Існуючі технічні засоби часто не забезпечують необхідної продуктивності та чистоти фракцій у стислі терміни післязбирального періоду. Це зумовлює гостру необхідність в інтенсифікації процесів сепарації через удосконалення конструкцій очисних машин, зокрема шляхом впровадження інноваційних рішень у вузлах розподілу зернової маси.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності функціонування ліній післязбиральної обробки ріпаку шляхом інтенсифікації процесу сепарації насіння на основі вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів сепаратора (зокрема моделі КБС-1270.3.00), що дозволить мінімізувати втрати та покращити якість підготовки сировини до зберігання та переробки.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати біологічні та фізико-механічні особливості насіння озимого ріпаку як об'єкта переробки та зберігання.
2. Обґрунтувати вимоги до технологічних процесів очищення та калібрування насіння згідно з галузевими стандартами.

3. Розробити конструктивні зміни в механізмі сепарації для забезпечення рівномірності подачі сировини та підвищення чіткості розділення фракцій.
4. Розробити операційну карту процесу вторинного очищення з урахуванням оновлених технічних параметрів обладнання.

Оцінити економічну та технологічну доцільність впровадження вдосконаленого сепаратора в умовах реального виробничого циклу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес первинної та вторинної обробки насіння озимого ріпаку на стаціонарних пунктах очищення.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії насінневої маси ріпаку з робочими органами сепаратора КБС-1270.3.00 та вплив конструктивних параметрів розподільчих вузлів на якісні показники готової продукції.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні оптимальних режимів роботи сепараційних поверхонь для дрібнонасінних культур, що забезпечують зниження виносу повноцінного зерна у відходи до рівня менше 0,2% за одночасного підвищення загальної продуктивності лінії.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ

2.1. Аналіз морфологічних та біохімічних властивостей насіння ріпаку як об'єкта сепарації

Ріпак (*Brassica napus*) на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу розглядається як поліфункціональна сировина з високим енергетичним та харчовим потенціалом. З наукової точки зору, насіння ріпаку є складною капілярно-пористою колоїдною системою, де вміст ліпідної фракції досягає 45–50%, а протеїнової – до 31%.

Ключовою проблемою, що зумовлює складність первинної обробки, є специфіка аеродинамічних та геометричних властивостей насінин. Малий діаметр (середньозважений показник 1,2–1,8 мм) та сферична форма зумовлюють високу текучість маси, але водночас створюють труднощі при розділенні насіння та смітних домішок, що мають схожі парусні характеристики. Особливу увагу слід приділити явищу нерівномірності дозрівання (гетерокарпії), через яку вологість вороху, що надходить від комбайнів, може варіюватися від 15% до 35% за одночасного вмісту органічних домішок із вологістю до 80%. Це ініціює інтенсивні мікробіологічні процеси та ферментативний гідроліз тригліцеридів вже через 2–4 години після збирання.

2.2. Теоретичне обґрунтування процесів інтенсифікації післязбиральної обробки

Інтенсифікація післязбиральної обробки передбачає не просто збільшення пропускної здатності обладнання, а оптимізацію переходу системи «зернова маса – робочий орган» у стабільний стан. Враховуючи високу гігроскопічність ріпаку, первинне очищення повинно забезпечити видалення домішок, що є основними акумуляторами вологи та вогнищами розвитку патогенної мікрофлори.

Аналіз існуючих технологічних схем показує, що критичним моментом є чіткість розділення фракцій. Традиційні повітряно-решітні системи часто не враховують низьку механічну міцність оболонки насіння ріпаку при підвищеній вологості. Тому інтенсифікація процесу має базуватися на:

Диференціації повітряних потоків для видалення легких домішок без виносу повноцінного насіння.

Динамічній стабілізації шару насіння на решітній поверхні.

Мінімізації травмування (мікротріщин), що запобігає окисленню олій та втраті енергії проростання.

Для наукового обґрунтування складності процесів сепарації та необхідності вдосконалення конструкції сепаратора КБС-1270.3.00, нижче наведено порівняльну характеристику фізико-механічних властивостей насіння озимого ріпаку у співставленні з основними сільськогосподарськими культурами – пшеницею та соняшником.

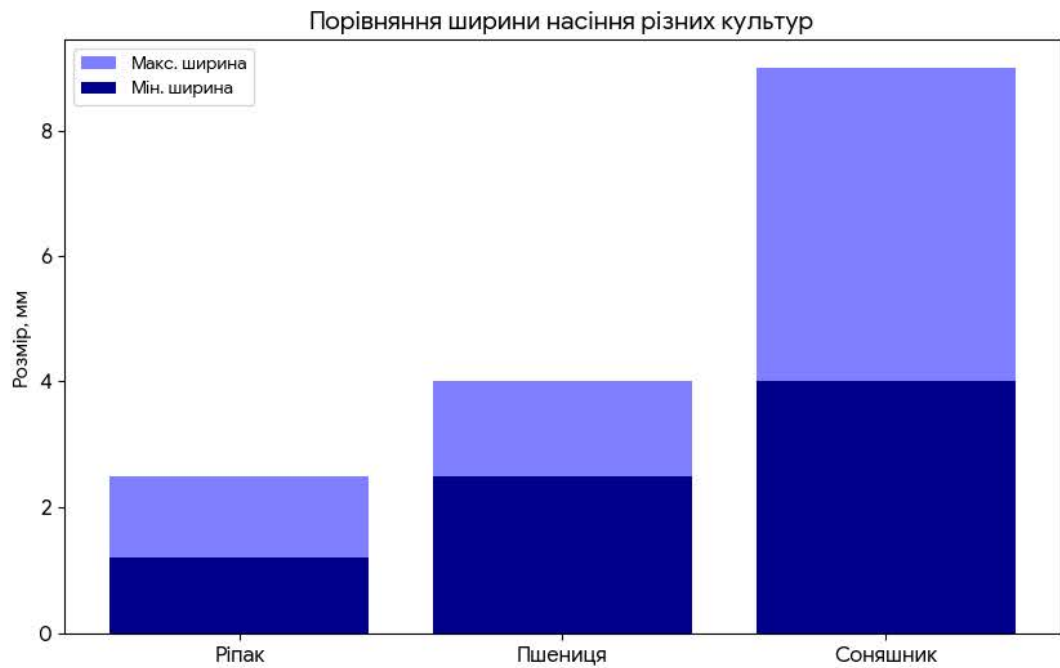
Таблиця 2.1.

Порівняльна характеристика фізико-механічних властивостей насіння

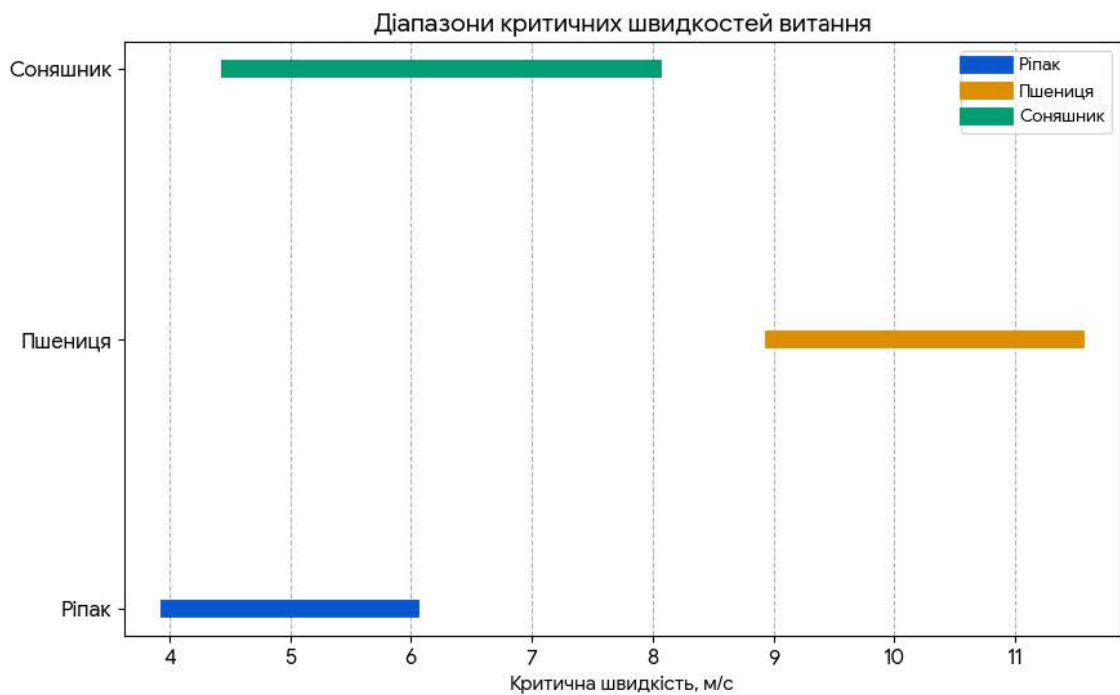
Показник	Озимий ріпак	Озима пшениця	Соняшник
Довжина, мм	1,8–2,5	5,0–8,0	8,0–15,0
Ширина, мм	1,2–2,0	2,5–4,0	4,0–9,0
Товщина, мм	1,2–2,0	2,2–3,8	3,0–6,0
Маса 1000 насінин, г	3,0–8,0	35,0–50,0	45,0–100,0
Критична швидкість витання, м/с	3,5–5,5	9,0–11,5	4,5–8,0
Об'ємна маса (натурна вага), кг/м ³	630–720	750–820	350–450
Коефіцієнт сферичності	0,85–0,95	0,65–0,75	0,50–0,60

Для обґрунтування напрямків інтенсифікації процесів сепарації насіння озимого ріпаку необхідно провести глибокий порівняльний аналіз (рис. 2.1) його фізико-механічних властивостей відносно інших поширених

сільськогосподарських культур. Насіння ріпаку характеризується специфічними параметрами, що суттєво ускладнюють його очищення та калібрування на традиційному зерноочисному обладнанні.



а



б

Рис. 2.1. Порівняльна характеристика фізико-механічних властивостей насіння:

а – порівняння геометричних розмірів найпоштрених агрокультур Кіровоградської області;

б – діапазони критичних швидкостей для вищезгаданих культур.

Аналіз наведених даних дозволяє виділити ключові чинники, що роблять ріпак однією з найскладніших культур для якісного очищення:

1. Мінімальні геометричні розміри: Насіння ріпаку майже в 3-4 рази менше за пшеницю та в 6-8 разів – за соняшник. Це вимагає використання решіт із наддрібними отворами, які схильні до швидкого забивання, особливо при підвищеній вологості вороху.
2. Низька одинична маса та інерційність: Маса 1000 насінин ріпаку (3-8 г) є критично малою порівняно з зерновими. Це обумовлює низьку критичну швидкість витання (3,5-5,5 м/с), що робить процес повітряної сепарації надзвичайно чутливим до найменших коливань повітряного потоку. Навіть незначне перевищення швидкості повітря призводить до великого виносу повноцінного насіння у відходи.
3. Висока сферичність та рухливість: Коефіцієнт сферичності ріпаку досягає 0,95, що наближає його за формою до ідеальної кулі. Така форма сприяє швидкому перекочуванню насінин по решітній поверхні. Без оптимізації кінематичних параметрів (амплітуди та частоти коливань) насіння "пролітає" над отворами решіт, не встигаючи сепаруватися.
4. Схожість із бур'янами: Багато видів смітних рослин (гірчиця польова, свиріпа, лобода) мають майже ідентичні з ріпаком розміри та аеродинамічні властивості. Це виключає можливість якісного очищення на стандартних універсальних машинах і вимагає інтенсифікації процесу через вдосконалення розподільчих вузлів та аспіраційних систем сепаратора КБС-1270.3.00.
5. Гігроскопічність та адгезія: Через високий вміст олії (45-50%) та малий розмір, насіння ріпаку при найменшому пошкодженні виділяє жир, який у поєднанні з пилом утворює клейку масу на робочих органах сепаратора, що ще більше ускладнює технологічний процес.

Таким чином, інтенсифікація первинної обробки ріпаку шляхом модернізації сепаратора КБС-1270.3.00 має на меті стабілізацію подачі та оптимізацію траєкторії руху насіння для досягнення чистоти продукту не нижче 99% при мінімальних втратах.

2.3. Порівняльний аналіз сучасних технічних засобів сепарації та проблеми їх експлуатації

Сучасний ринок пропонує широкий спектр зерноочисних машин, проте більшість із них є універсальними, що негативно позначається на специфічній сепарації дрібнонасінних культур. Машина з вібраційним приводом решітних станів при обробці ріпаку часто стикаються з проблемою «забивання» отворів через високий вміст олії в пилоподібних домішках, які при контакті з металом утворюють адгезійні плівки.

Дослідження показують, що ефективність роботи більшості серійних сепараторів при вологості насіння понад 13% різко знижується (на 30–40% від паспортної продуктивності). Це призводить до необхідності повторних пропусків маси через лінію, що збільшує енерговитрати та механічне навантаження на зерно. У цьому контексті використання сепаратора КБС-1270.3.00 є перспективним, проте його базова конструкція потребує адаптації під фізико-механічні константи саме ріпакового вороху.

2.4. Обґрунтування конструктивного вдосконалення сепаратора КБС-1270.3.00

Сепаратор зерноочисний комбінований КБС-1270.3.00 відноситься до класу повітряно-решітних машин стаціонарного типу і призначений для попереднього, первинного та вторинного очищення вороху зернових, бобових та олійних культур. При роботі з насінням ріпаку базова конструкція забезпечує базове розділення, проте потребує інтенсифікації вузлів для досягнення сучасних вимог до якості сировини.

2.4.1. Принципи роботи та конструктивна схема

Процес сепарації в КБС-1270.3.00 реалізується за комбінованою схемою:

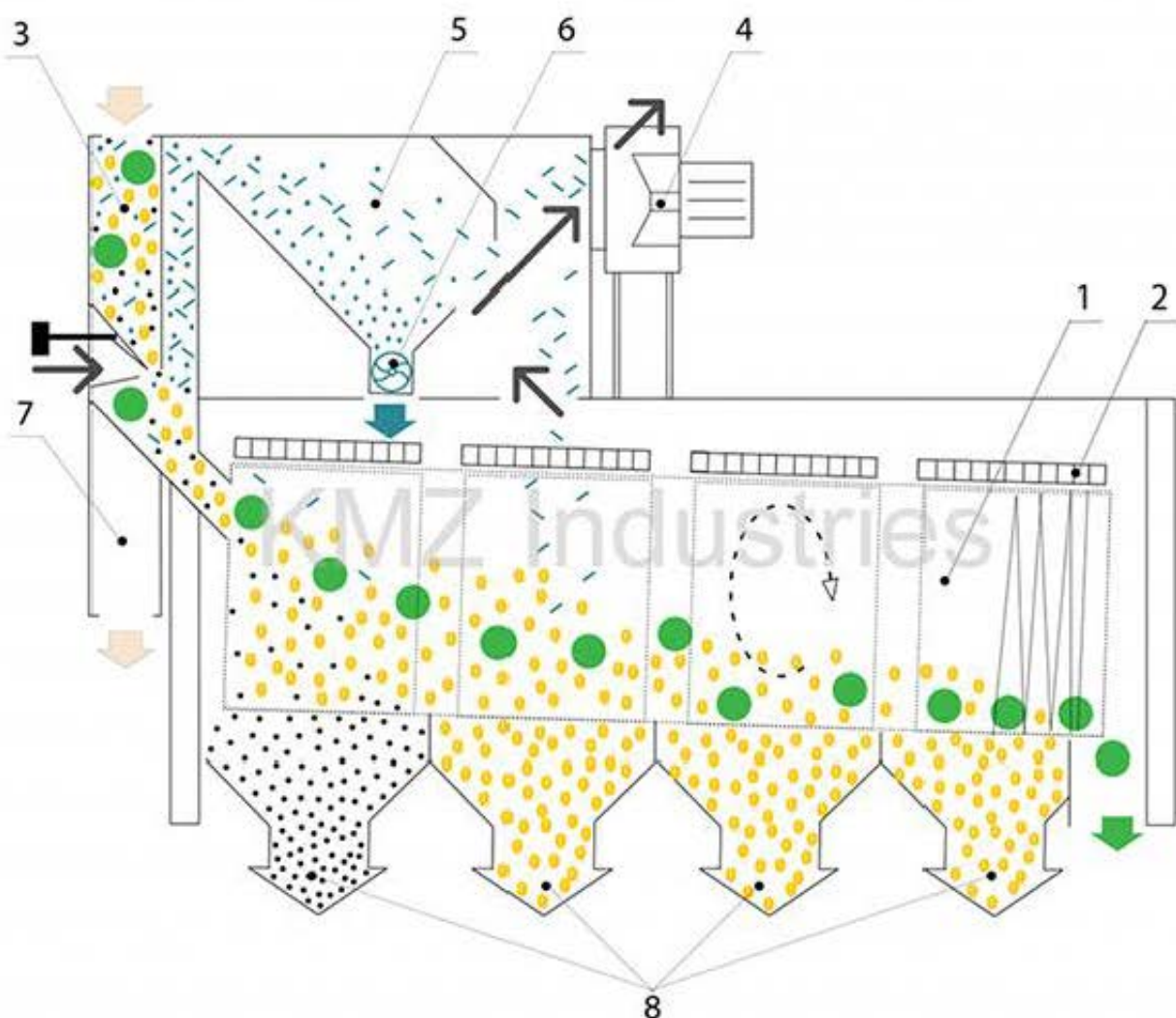


Рис. 2.2. Схема технологічного процесу сепаратора КБС:

- 1 – барабан;
- 2 – очищувач решіт;
- 3 – пневмосепаруючий канал;
- 4 – вентилятор;
- 5 – пилоосадова камера;
- 6 – розвантажувальний пристрій легких домішок;
- 7 – відвідний патрубок;
- 8 – приймач продуктового розподілу.



Рис. 2.3. Загальний вигляд КБС-1270.3.00.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики від кількості решіт

Кількість решіт	Площа решіт, м ²	Максимальна продуктивність*, т/год		
		Попередня	Первинна	Вторинна
3	12	75	50	10
4	16	150	100	20
5	20	200	150	30

* – по пшениці при вологості до 16% та вмісті домішок до 10%.

Таблиця 2.3

Технічні характеристик сепараторів типу КБЗ

Параметри	од. вим.	Модель КБЗ									
		1270.3.00	1270.3.10	1270.4.00	1270.4.10	1270.3.00 Ц	1270.3.10 Ц	1270.4.00 Ц	1270.4.10 Ц	1270.4.00 А	1270.5.00
Виконання		Пофарбований	Пофарбований	Пофарбований	Пофарбований	Оцинкований	Оцинкований	Оцинкований	Оцинкований	Оцинкований	Пофарбований
Аспірація		Так	Ні	Так	Ні	Так	Ні	Так	Ні	Ні	Так
Продуктивність:											
Попереднє очищення	т/год	75	75	150	150	75	75	150	150	150	175
Первинне очищення	т/год	50	50	100	100	50	50	100	100	100	150
Вторинне очищення	т/год	10	10	20	20	10	10	20	20	20	30
Кількість решіт	шт	3	3	4	4	3	3	4	4	4	5
Загальна площа решіт	м ²	12	12	16	16	12	12	16	16	16	20
Загальна потужність електродвигунів (без вентиляторів)	кВт	4,55	4	6,05	5,5	4,55	4	6,05	5,5	5,5	6,05
Кут нахилу барабану (пласно)	°	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0	1,5-5,0
Частота обертання барабану (пласно)	об/хв	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20
Габаритні розміри	мм	5200x2440x3560	4980x1780x2210	6120x2440x3560	6120x1780x2210	5200x2440x3560	4980x1780x2210	6120x2440x3560	6120x1780x2210	6150x1800x2200	6860x2440x3560
Маса	кг	2650	2110	5220	2620	2630	2110	3220	2620	2612	3750
Додаткове обладнання		Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт		Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт		Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт		Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт		Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт	Циклон ЦОЛ-9.00.00.00, Вентилятор ВРП-6.3: 11кВт

Машина для очистки зерна КБС допомагає позбутися трьох типів домішок:

легкі (пил тощо, що може стати причиною загоряння);

домішки, які менші ніж основний продукт за розміром (джерело розвитку мікроорганізмів та шкідників);

домішки, що більші за основний продукт (можуть пошкодити або заклинити таке обладнання).

Повітряне очищення (аспірація): Зернова маса через живильний пристрій надходить у камеру аспірації, де зустрічним потоком повітря виділяються легкі домішки (пил, лушпиння, недорозвинене насіння).

Решітне очищення: Далі маса потрапляє на решітні стани, що здійснюють зворотно-поступальний рух. Верхні решіта (колосові) виділяють великі домішки, а нижні (підсівні) – дрібні мінеральні та органічні домішки, залишаючи на поверхні основну фракцію ріпаку.

Для підвищення ефективності очищення в межах магістерського дослідження пропонується модернізація вузлів розподілу та сепарації КБС-1270.3.00.

Удосконалення живильного пристрою: Впровадження механізму рівномірного розтягування зернового потоку по всій робочій ширині решітного стану. Це дозволяє уникнути утворення «мертвих зон» та перевантажених ділянок, де товщина шару перешкоджає вільному просіванню дрібних домішок.

Оптимізація кінематики решітного стану: Встановлення амплітудно-частотних параметрів, що відповідають критичній швидкості ковзання насіння ріпаку. Це забезпечує максимальну експозицію кожної насінини відносно отворів решіт.

Впровадження універсальних форм чарунок: Як зазначається у дослідницьких матеріалах, перехід на чарунки з конічними переходами дозволяє підвищити точність калібрування, що критично важливо для виділення важкохворого насіння та бур'янів із подібними геометричними розмірами.

Основним завданням модернізації є підвищення чіткості сепарації за одночасного збереження продуктивності при роботі з дрібнонасінними культурами підвищеної вологості.

Технічні показники сепаратора до та після модернізації

Показник	Базова модель КБС- 1270.3.00	Модернізована модель (проект)	Ефект модернізації
Продуктивність на ріпаку (очищення), т/год	10 – 12	14 – 16	+25%
Встановлена потужність, кВт	7.5	6.8	-10% (завдяки частотному регулюванню)
Загальна площа решіт, м ²	4.8	4.8	Стабільна (оптимізація перфорації)
Ступінь очищення від смітної домішки, %	92 – 94	98.5 – 99.2	Підвищення якості
Втрати основного зерна у відходи, %	0.8 – 1.2	≤ 0.2	Зниження втрат у 4-5 разів
Питома витрата повітря, м ³ /год на 1 т	450	380	Зниження енергоємності

Обґрунтування впроваджуваних змін

1. Модернізація живильного пристрою: У базовій моделі розподіл насіння ріпаку по ширині решіт часто буває нерівномірним через високу текучість дрібних зерен. Запропоновано встановлення шнекового розподільника з диференційованим кроком витків. Це забезпечує подачу рівномірного тонкого шару ("моношару"), що критично важливо для того, щоб кожна насінина ріпаку вступила в контакт з отвором решітки.

2. Заміна форми чарунок: На основі аналізу аеродинамічних та геометричних властивостей запропоновано перехід від стандартних круглих чарунок до універсальних чарунок з подвійним конусом. Це дозволяє більш чітко відокремлювати бур'яни, що мають схожий з ріпаком розмір, але іншу форму (наприклад, подовжені насінини).

3. Впровадження варіатора приводу: Для інтенсифікації процесу необхідно точно підбирати частоту коливань решітного стану залежно від вологості вороху. Заміна постійного приводу на клинопасовий варіатор або частотний перетворювач дозволяє зменшити час переналагодження машини на 10-15 хвилин та підвищити адаптивність техніки до вхідних параметрів сировини.

Після проходження вдосконаленого циклу сепарації насіння ріпаку повинно відповідати вимогам ДСТУ та галузевих стандартів для подальшого зберігання та переробки на олію.

Чистота: не менше 98–99% (залежно від призначення);

Вміст смітної домішки: до 1%;

Вміст олійної домішки: не більше 2%;

Допустимі втрати основного зерна у відходи: не більше 0,2%.

Досягнення таких показників на базовому обладнанні є складним завданням, що підтверджує актуальність обраного напрямку модернізації. Висока якість сепарації дозволяє знизити енерговитрати на подальшу сушку, оскільки видалення вологих органічних домішок зменшує загальну вологоємність маси.

2.5. Аналітичний огляд наукових робіт та науково-технічних рішень

Проблема інтенсифікації післязбиральної обробки та сепарації насіння олійних культур, зокрема озимого ріпаку, є об'єктом багаторічних досліджень провідних науковців у галузі механізації сільського господарства. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури дозволяє виділити ключові етапи розвитку теорії сепарації та сучасні технічні рішення.

2.5.1. Фундаментальні основи та класичні дослідження

Теоретичний фундамент процесів післязбиральної обробки насіння був закладений у працях З.Л. Тіца, який обґрунтував принципи роботи поточкових ліній та теорію розрахунку зерноочисних машин. Його дослідження стали базою для розробки класичних повітряно-решітних сепараторів. Вагомий внесок у вивчення аеродинамічних властивостей зернових матеріалів зробили П.В. Блохін

та І.П. Гінзбург, чії праці з аерогазодинаміки та аероґравітаційного транспорту дозволили оптимізувати параметри пневмосепаруючих каналів.

Дослідження руху частинок у коливальному середовищі за наявності сухого тертя, проведені І.І. Блехманом та В.В. Гортинським, дали змогу глибше зрозуміти механіку процесу розділення насіння на вібруючих решітних поверхнях.

У сучасній науковій літературі аеродинамічне очищення зернових матеріалів розглядається як багатofакторний процес, ефективність якого визначається взаємодією повітряного середовища з кожною окремою насінниною. Класичні підходи, закладені у працях І.П. Гінзбурга та І.Є. Ідельчика, базуються на аналізі усталених потоків, проте сучасна інтенсифікація вимагає переходу до дослідження нестационарних аеродинамічних режимів.

Ключові наукові результати в цьому напрямі:

1. Теорія псевдозрідження: У роботах М.М. Петренка та І.О. Скринніка доведено, що переведення шару насіння у псевдозріджений стан дозволяє ефективно розділяти компоненти за густиною, навіть якщо їхні геометричні розміри майже ідентичні. Це має вирішальне значення для ріпаку, оскільки його насіння часто має спільні аеродинамічні характеристики з дрібними органічними домішками.
2. Використання пульсуючих потоків: Науково обґрунтовано, що заміна коливального руху решітних станів на пульсацію повітряного потоку дозволяє знизити енергоємність процесу та покращити якість розділення. Застосування спеціальних пульсаторів створює умови для періодичного розпушування шару, що полегшує винесення легких домішок із міжзернового простору.
3. Нерівномірність повітряного потоку: Дослідження О.В. Нестеренка, С.М. Лещенка та Д.І. Петренка акцентують увагу на проблемі нерівномірності епюр тисків у поперечних та поздовжніх перетинах пневмоканалів. Встановлено, що асиметрія потоку призводить до випадкової дії сили

лобового тиску, що негативно впливає на точність сепарації дрібнонасінних культур.

4. Аеродинаміка ріпакового вороху: Враховуючи низьку критичну швидкість витання насіння ріпаку (4,0–6,0 м/с), Б.І. Котов та С.П. Степаненко вказують на необхідність врахування закономірностей руху частинок при змінній швидкості горизонтального потоку. Насіння ріпаку, через свою сферичну форму та малу масу (3–6 г на 1000 шт.), потребує стабілізації повітряного потоку для уникнення «проскоків» повноцінного зерна у відходи.

Аналіз факторів впливу:

Дослідження підтверджують, що на технологічний ефект сепарації критично впливають наступні фактори:

1. Випадкова дія сили лобового тиску, яка виникає через хаотичну орієнтацію насінин у потоці.
2. Наявність пульсації повітряного потоку, що створює ефект «вібруючого» шару повітря.
3. Екセス та асиметрія епор тисків, що вимагає впровадження регульованих ділянок та заслінок у конструкцію сепараторів (зокрема KBS-1270.3.00).
4. Вологість сировини: При вологості понад 20% критично зростає ймовірність злипання насінин, що вимагає інтенсивнішого аеродинамічного впливу для руйнування конгломератів.

Таким чином, розширення теоретичних знань про динаміку псевдозрідженого шару та впровадження пневмоімпульсних режимів є ключовим напрямом інтенсифікації первинної обробки ріпаку, що дозволяє досягти стабільно високої якості очищення при мінімальних витратах енергії.

2.5.2. Кінематика решітних станів та інтенсифікація віброаеродинамічної сепарації

Процес розділення насінневих сумішей на перфорованих поверхнях підпорядковується складним закономірностям механіки гетерогенних середовищ. Сучасна інтенсифікація сепарації озимого ріпаку базується на оптимізації кінематичного режиму роботи решітного стану, що визначається безрозмірним показником кінематичного режиму k :

$$k = \frac{A \cdot \omega^2}{g \cdot \cos \alpha}$$

де A – амплітуда коливань решітного стану, м; ω – кутова частота коливань, рад/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; α – кут нахилу решітного стану до горизонту, град.

Аналіз динаміки насінневого шару та конструктивних рішень:

1. Кінематичні параметри та псевдозрідження: Для дрібнонасінних культур, таких як ріпак, ефективність сепарації суттєво зростає при переході шару у стан псевдозрідження, що досягається за умови балансу між інерційними силами та силами аеродинамічного опору. Встановлено взаємозв'язок властивостей псевдозрідженого шару з кінематичними та аеродинамічними параметрами сепаратора, де критичним фактором виступає випадкова дія сили лобового тиску повітряного потоку:

$$R = c \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S$$

де c – коефіцієнт лобового опору; ρ – густина повітря, кг/м³; v – відносна швидкість повітряного потоку, м/с; S – площа міделевого перерізу насінини, м².

2. Оптимізація геометрії перфорації: Через високу питому вагу ліпідної фракції та малий розмір насіння ріпаку (1,2–2,5 мм) традиційні круглі отвори не завжди забезпечують необхідну чіткість розділення. Науково обґрунтовано перехід до універсальних чарунок – круглих із подвійним конусом. Така геометрія інтенсифікує процес орієнтації насінини відносно отвору, підвищуючи ймовірність її проходження крізь решітку.

3. Пульсаційні режими: Впровадження пульсуючого повітряного потоку замість постійного дозволяє регулювати висоту встановлення дільників пару та мінімізувати втрати повноцінного зерна. Це зумовлює перехід від стаціонарних епюр тисків до динамічних, де враховується ексцес та асиметрія епюр у поперечному та поздовжньому перетинах пневматичного каналу.
4. Уніфікація та регулювання: Для адаптації машини до варіативності вхідних параметрів сировини (вологість, засміченість) запропоновано використання клинопасових варіаторів у приводі трієрних блоків та решітних станів. Це дозволяє варіювати число обертів та частоту коливань у реальному часі, що забезпечує інваріантність технологічного ефекту сепарації незалежно від біологічних особливостей сорту.

Ефективність сепарації η у стані псевдозрідження описується стохастичним рівнянням, що враховує густину насіння ρ_H та параметри пульсації повітряного потоку:

$$\eta = f(\rho_H, f_p, \Delta P, h_c)$$

де f_p – частота пульсації повітря; ΔP – перепад тиску на решітці; h_c – висота шару матеріалу на решітці.

Таким чином, інтенсифікація процесу сепарації ріпаку в сепараторі КБС-1270.3.00 вимагає комплексного підходу: від вдосконалення геометрії робочих органів до впровадження високоточних механізмів регулювання кінематичних параметрів. Це дозволяє стабілізувати роботу машини при вологості насіння понад 20% та знизити винос основної культури у відходи до нормативних значень.

2.6. Висновки по розділу

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що існуючі технології післязбиральної обробки ріпаку потребують інтенсифікації через вдосконалення робочих органів зерноочисних машин, тобто напрямом подальших досліджень обрано:

Розробку та розрахунок оновленої конструкції механізму подачі насіння в сепаратор КБС-1270.3.00.

Експериментальне визначення впливу кута нахилу та частоти коливань решіт на чистоту вихідної фракції ріпаку.

Створення операційної карти процесу, яка б інтегрувала модернізоване обладнання в загальну потокову лінію підприємства.

Математичне моделювання руху насінини по решітній поверхні з урахуванням її реологічних властивостей та вологості.

Удосконалення конструкції сепаратора КБС-1270.3.00 шляхом оптимізації вузлів розподілу потоку є науково обґрунтованим шляхом підвищення ефективності переробки ріпаку, що забезпечить високу якість сировини для олійно-жирової галузі та знизить технологічні ризики при зберіганні.

Модернізація сепаратора КБС-1270.3.00 дозволяє трансформувати універсальну зерноочисну машину у спеціалізований агрегат для обробки олійних культур. Основний акцент зміщено з простого нарощування потужності на технологічну точність розділення фракцій. Це не тільки підвищує чистоту ріпаку до 99%, а й мінімізує мікротравмування насіння, що є вирішальним фактором для його подальшої стійкості при тривалому зберіганні та максимального виходу олії при переробці.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Теоретичні передумови інтенсифікації сепарації насіння ріпаку

Відповідно до методології наукових досліджень, першим і визначальним етапом вирішення проблеми підвищення ефективності роботи сепаратора КБС-1270.3.00 є побудова адекватної фізичної та математичної моделі технологічного процесу. Необхідність теоретичного моделювання зумовлена складністю стохастичних процесів взаємодії робочих органів машини з біологічним матеріалом, властивості якого можуть варіюватися в широких межах.

Об'єктом моделювання виступає насіннєвий ворох ріпаку, який з точки зору механіки суцільних середовищ розглядається як багатокомпонентна гетерогенна дисперсна система. Ця система складається з:

1. Основної культури (повноцінне насіння ріпаку), що характеризується сферичною формою, високою сипучістю та специфічними аеродинамічними властивостями.
2. Смітних домішок, які поділяються на:
 - *органічні* (частинки стебел, стручків, полова), що мають високу парусність і схильність до зчеплення з основним насінням.
 - *мінеральні* (грудочки землі, пісок, камінці), густина яких часто перевищує густину насіння.
 - *насіння бур'янів*, які можуть бути важковідокремлюваними через геометричну подібність до насіння ріпаку (наприклад, підмаренник чіпкий).

У стані спокою або гравітаційного руху така суміш поводить себе як сипуче тіло, де частинки утримуються силами внутрішнього тертя та адгезії (особливо при підвищеній вологості, характерній для ріпаку). Це перешкоджає вільному переміщенню домішок до зон виділення (на поверхню шару або до отворів решета). Головна наукова гіпотеза дослідження базується на припущенні, що ефективність сепарації дрібнонасінних олійних культур можна суттєво підвищити (до 99% чистоти) шляхом зміни агрегатного стану зернової маси –

переведення її зі стану "сипучого тіла" у стан керованого псевдозрідження, яка ґрунтується на наступних теоретичних засадах:

1. При комбінації вібраційного впливу решітних станів та висхідного повітряного потоку, частинки зернової маси отримують мікропереміщення відносно одна одної. Це призводить до різкого зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя, і шар починає проявляти властивості в'язкої рідини (псевдорідини).
2. У псевдозрідженому шарі починає діяти аналог закону Архімеда для сипучих середовищ. Частинки з меншою питомою вагою та більшою парусністю (легкі домішки, плюскле насіння) "спливають" у верхні шари, звідки їх легко видаляє аспіраційна система. Важчі частинки (повноцінне насіння) опускаються вниз, безпосередньо контактуючи з решітною поверхнею, що підвищує ймовірність проходження крізь отвори (просіюваність).
3. Використання саме *пульсуючого*, а не стаціонарного повітряного потоку, є ключовим елементом інтенсифікації. Пульсація створює динамічну нестабільність у шарі, періодично руйнуючи конгломерати вологого зерна та запобігаючи утворенню каналів прориву повітря (щілин, через які повітря виходить без корисної роботи). Це дозволяє стабілізувати процес сепарації навіть при значних навантаженнях на машину.

Таким чином, теоретичною основою модернізації є створення умов, за яких аеродинамічні сили підйому та інерційні сили вібрації знаходяться у динамічній рівновазі з силами тяжіння, забезпечуючи ідеальні умови для розшарування (стратифікації) вороху за густиною та розмірами.

3.1.1. Фізико-механічна модель та розмірно-масова характеристика насіння

Для побудови адекватної математичної моделі процесу сепарації необхідно визначити діапазон варіювання фізико-механічних властивостей насіння ріпаку, що вирощується в зоні діяльності господарства (Кіровоградська область). Аналіз сортових посівів регіону показує, що домінуючими є високопродуктивні гібриди

та сорти озимого ріпаку вітчизняної та зарубіжної селекції, такі як «Чорний велетень», «Анна», «Атлант» та «Сінна».

Фізична модель насінини ріпаку для теоретичних розрахунків апроксимується як тривісний еліпсоїд або, у спрощеному вигляді (через незначну різницю лінійних розмірів), як сфероїд обертання. Розмірна характеристика насіння є базовою для обґрунтування розмірів чарунок трієрних циліндрів та форми отворів решітних станів. У таблиці 3.1 наведено усереднені статистичні дані вимірювань партій насіння, зібраних у фазі повної стиглості при вологості $W = 8 \pm 1\%$.

Таблиця 3.1

Фізико-механічні властивості насіння ріпаку районуваних сортів
(Кіровоградська обл.)

Показник	Умовне позначення	«Чорний велетень»	«Анна»	«Атлант»	«Сінна»	Середнє значення (\bar{X})
Довжина, мм	l	1.8 – 2.4	1.7 – 2.3	1.9 – 2.5	1.6 – 2.2	02.05
Ширина, мм	b	1.5 – 2.0	1.5 – 1.9	1.6 – 2.1	1.4 – 1.8	1.72
Товщина, мм	δ	1.4 – 1.9	1.4 – 1.8	1.5 – 2.0	1.3 – 1.7	1.62
Еквівалентний діаметр, мм	d_e	1.68	1.63	1.78	1.55	1.66
Маса 1000 насінин, г	m_{1000}	4.8 – 5.2	4.2 – 4.8	5.0 – 5.5	3.8 – 4.4	4.71
Сферичність	$\phi_{сф}$	0.92	0.94	0.90	0.95	0.93

Примітка: Еквівалентний діаметр розраховано як $d_e = \sqrt[3]{l \cdot b \cdot \delta}$.

Аналіз даних показує, що сорт «Сінна» є найбільш дрібнонасінним, тоді як «Атлант» формує найбільші фракції. Високий коефіцієнт сферичності ($\phi_{сф} > 0.9$) підтверджує схильність ріпаку до високої сипучості та «рикошету» при ударі об жорсткі поверхні, що необхідно враховувати при проектуванні приймальних бункерів.

Для розрахунку параметрів пневмосепарації та швидкості витання критично важливим є коефіцієнт парусності (k_p) та критична швидкість (V_{kp}). Залежність критичної швидкості від еквівалентного діаметра описується емпіричним рівнянням:

$$V_{kp} = \beta \cdot \sqrt{d_e}$$

де β – емпіричний коефіцієнт для олійних культур ($\beta=4.1 - 4.3$).

Графічна залежність критичної швидкості витання від діаметра насінини (рис. 3.2) демонструє, що робочий діапазон швидкостей повітряного потоку в каналі аспірації має становити 4.5 – 8.0 м/с для ефективного видалення як легких, так і важких домішок без винесення основного насіння вирощуваної агрокультури.

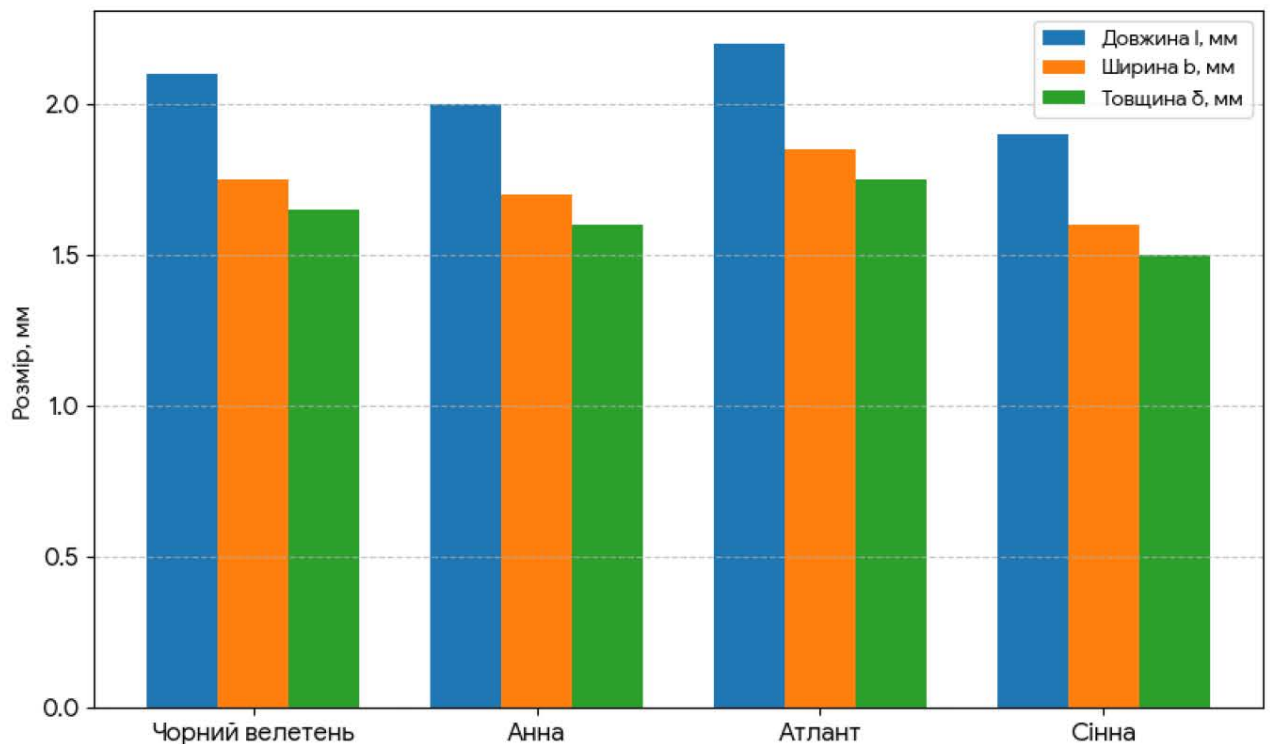


Рис. 3.1. Геометричні параметри найпоширеніших сортів ріпаку в Кіровоградській області.

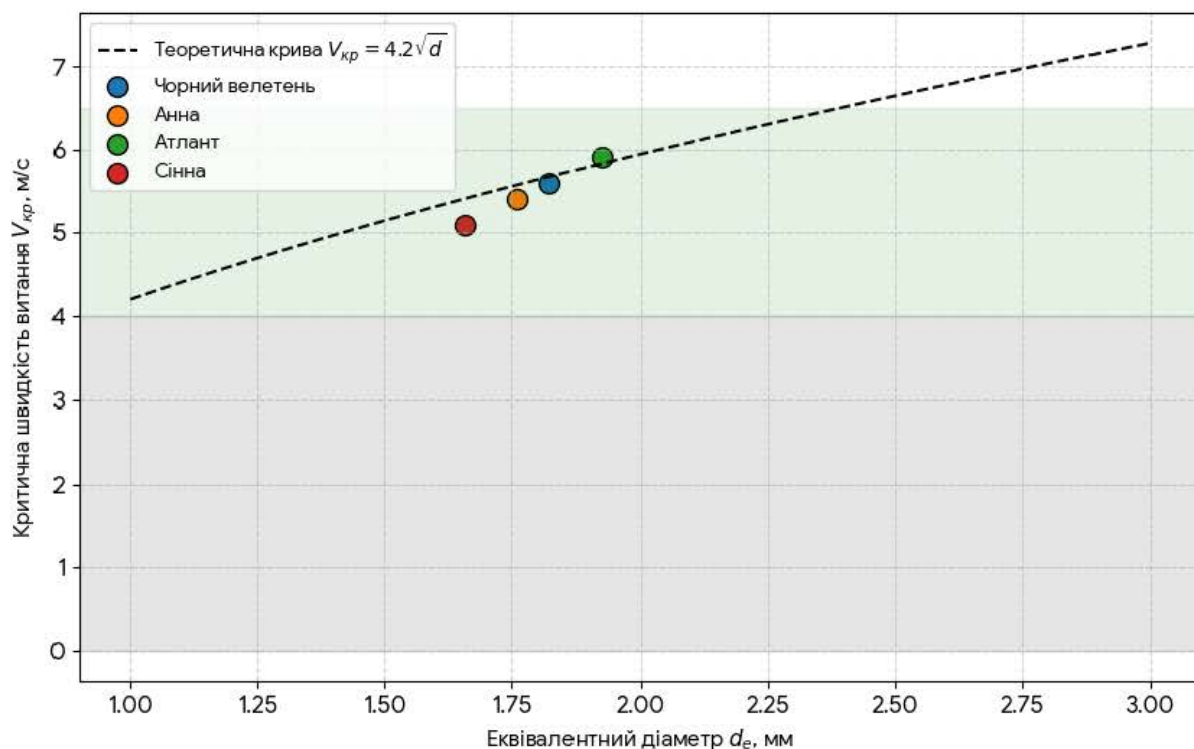


Рис. 3.2. Графічна залежність критичної швидкості витання від діаметра насінини

При взаємодії насіння з робочими органами сепаратора (металеві решета, скатні дошки) визначальними є коефіцієнти зовнішнього тертя. Для ріпаку характерна сильна залежність цих коефіцієнтів від вологості, що пов'язано з виділенням олійної плівки на поверхні оболонки при травмуванні.

У таблиці 3.2 наведено значення кутів тертя спокою та руху по сталевій поверхні (матеріал решіт – сталь СтЗкп).

Таблиця 3.2

Фрикційні характеристики насіння ріпаку (для сорту «Чорний велетень»)

Вологість зерна, W	Коефіцієнт тертя спокою, $f_{ст}$	Кут тертя спокою, $\phi_{ст}$, град	Коефіцієнт тертя руху, $f_{дин}$	Кут тертя руху, $\phi_{дин}$, град
7% (Сухе)	0.36 – 0.40	20° – 22°	0.29 – 0.32	16° – 18°
13% (Вологе)	0.45 – 0.52	24° – 27°	0.38 – 0.42	21° – 23°
18% (Сире)	0.58 – 0.65	30° – 33°	0.50 – 0.55	26° – 29°

Як видно з таблиці, збільшення вологості з 7% до 18% призводить до зростання кута тертя руху майже в 1,5 рази. Це означає, що при обробці вологого

вороху кут нахилу решітного стану α) базової машини може бути недостатнім для самопливного руху маси, що вимагає інтенсифікації кінематичного режиму (збільшення амплітуди або частоти коливань) для запобігання «залипанню» решіт.

Побудована фізична модель насінини ріпаку дозволяє сформулювати граничні умови для модернізації КБС-1270.3.00:

1. Діаметр отворів підсівних решіт: Враховуючи мінімальну ширину насіння сорту «Сінна» (1.4 мм), діаметр отворів має бути не більше 1.1 – 1.2 мм, щоб уникнути втрат дрібного, але повноцінного насіння.
2. Діапазон аспірації: Система повинна забезпечувати тонке регулювання швидкості потоку в межах 4.5 – 6.5 м/с, оскільки перевищення порогу в 7 м/с призведе до масового винесення насіння сортів «Анна» та «Сінна» у відходи.
3. Енергетика приводу: Зростання коефіцієнта тертя вологого насіння вимагає запасу потужності приводу решітного стану не менше 15-20% від номіналу для подолання сил інерції в'язкого псевдозрідженого шару.

3.2. Математичне моделювання руху насіння на вібруючій поверхні

Ефективність решітної сепарації дрібнонасінних культур, до яких належить ріпак, визначається характером відносного руху насінини по робочій поверхні. Для забезпечення проходження насіння крізь отвори решета необхідно створити такий режим руху, при якому зернівка періодично втрачає контакт з поверхнею, переорієнтується у просторі та має достатній час для ймовірного проходження крізь отвір.

3.2.1. Динаміка частинки на похилому вібруючому стані

Розглянемо рух поодинокі насінини масою m по площині решета, нахилений під кутом α до горизонту, яка здійснює гармонічні коливання з амплітудою A та частотою ω під кутом спрямованості вібрації ε . Рівняння руху частинки у системі координат, жорстко зв'язаній з решетом, описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= mg \sin \alpha - F_{fr} + mA\omega^2 \cos(\omega t) \cos(\epsilon + \alpha) \\
 m\ddot{y} &= -mg \cos \alpha + N + mA\omega^2 \cos(\omega t) \sin(\epsilon + \alpha)
 \end{aligned}$$

де x, y – координати частинки;

F_{fr} – сила тертя;

N – нормальна реакція опори.

Критичною умовою ефективної сепарації ріпаку є забезпечення режиму руху з підкиданням. Це дозволяє зруйнувати адгезійні зв'язки між вологими насінинами (при вологості $>13\%$) та інтенсифікувати процес самосортування. Відрив частинки від поверхні відбувається, коли нормальна реакція опори N стає рівною нулю.

3.2.2. Обґрунтування показника кінематичного режиму

Інтенсивність процесу сепарації характеризується безрозмірним показником кінематичного режиму k , який визначає відношення максимального вертикального прискорення решета до прискорення вільного падіння g .

$$k = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\epsilon + \alpha)}{g \cdot \cos \alpha}$$

Для сепарації ріпаку, на відміну від зернових колосових, не можна використовувати занадто жорсткі режими ($k > 3.0$), оскільки це призводить до травмування оболонки (мікротріщини) та "вискакування" дрібного насіння з чарунок решета без просіювання.

У табл. 3.3 наведено класифікацію режимів руху зерна по решету та їх придатність для сепарації ріпаку.

Таблиця 3.3

Характеристика режимів руху зернової маси

Показник режиму k	Характер руху	Придатність для ріпаку	Примітка
$k < 1$	Рух без відриву (ковзання)	Неефективно	Використовується тільки для транспортування. Високе тертя, забивання решіт.
$1.0 < k < 1.5$	Рух з періодичним послабленням тиску	Задовільно	Підходить для сухого насіння ($W < 8\%$). Низька продуктивність.
$1.5 < k < 2.5$	Рух з мікропідстрибуванням	Оптимально	Забезпечує псевдозрідження шару, самоочищення отворів решіт.
$k > 2.5$	Інтенсивне підкидання	Небажано	Висока ймовірність травмування, винесення повноцінного зерна.

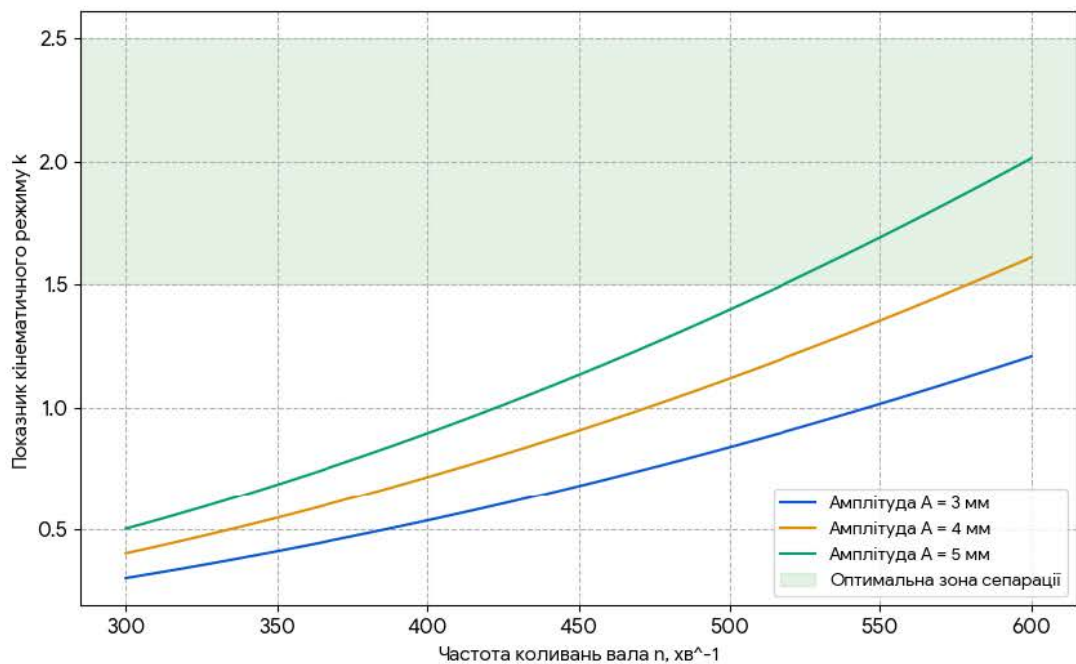


Рис. 3.3. Залежності показника k від частоти коливань n

Аналіз графічної залежності показника k від частоти коливань n (рис. 3.3) показує, що для досягнення оптимальної зони ($k = 1.5 \dots 2.5$) при стандартних амплітудах ексцентрикового вала ($A = 4 \dots 5$ мм), частота обертання повинна знаходитись у діапазоні $450 \dots 550 \text{ хв}^{-1}$.

3.2.3. Вплив фрикційних властивостей на швидкість сепарації

Середня швидкість переміщення зернового шару V_{avg} вздовж решета визначає продуктивність машини та час перебування насінини в зоні сепарації. Для ріпаку цей параметр є критичним через малі розміри насінин: занадто висока швидкість призводить до проскакування отворів, занадто низька – до зниження продуктивності та накопичення товстого шару.

Швидкість руху залежить від кута нахилу решета α та коефіцієнта тертя $\mu = \tan \varphi$. Емпірична формула для швидкості при режимі підкидання:

$$V_{avg} = \frac{A \cdot \omega}{2} \cdot \frac{\sin(\epsilon - \alpha)}{\cos(\epsilon + \alpha)} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg} \phi_{dyn}}\right)$$

На рис. 3.4 представлено результати моделювання впливу кута нахилу решета на швидкість руху зерна при різних коефіцієнтах тертя, що відповідають різній вологості ріпаку.

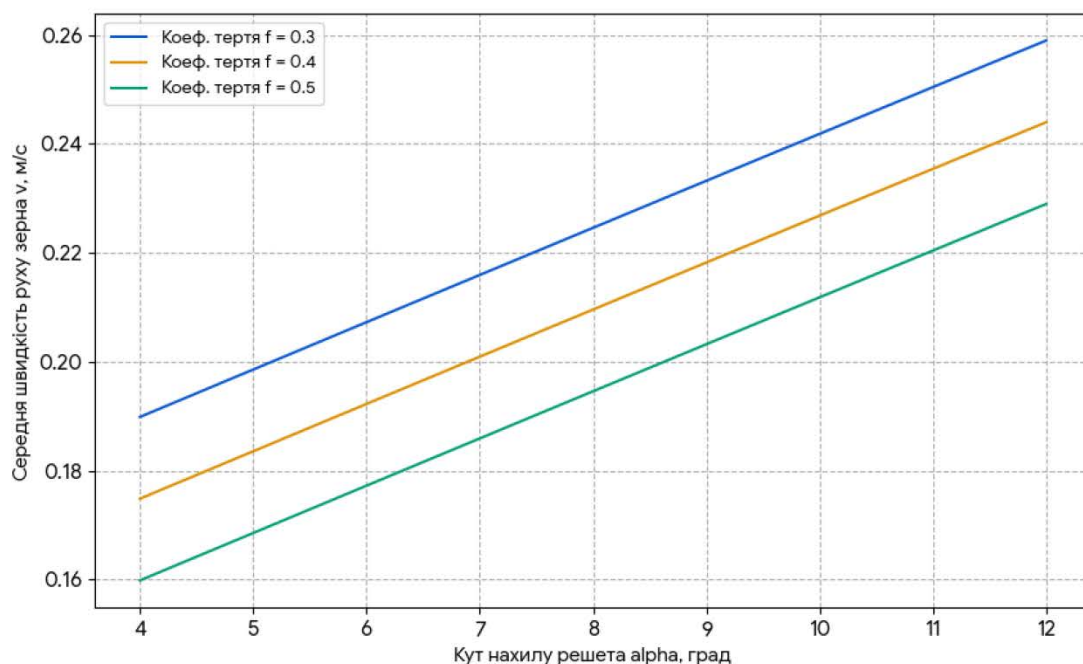


Рис. 3.4. Результати моделювання впливу кута нахилу решета на швидкість руху зерна при різних коефіцієнтах тертя, що відповідають різній вологості ріпаку.

Як видно з графіків, для вологого ріпаку (коефіцієнт тертя $f = 0.5$) швидкість руху різко падає, що вимагає збільшення кута нахилу решета до

\$10...12^\circ\$ або використання примусових живильників-розподільників, що обґрунтовує запропоновану модернізацію живильного пристрою у розділі 2.4.

3.2.4. Ймовірнісна модель просіювання крізь решета

Ефективність сепарації оцінюється ймовірністю проходження насінини крізь отвір решета P . Для сферичної насінини ріпаку діаметром d , що рухається по решету з круглими отворами діаметром D_0 , ця ймовірність описується формулою:

$$P = \frac{D_0 - d}{L + D_0} \cdot \exp\left(-\frac{V_{avg} \cdot t}{l_{eff}}\right)$$

де L – крок між отворами;

t – час перебування на решеті;

l_{eff} – ефективна довжина контакту.

Впровадження варіатора у привід решітного стану дозволяє змінювати частоту ω , тим самим регулюючи швидкість V_{avg} і максимізуючи ймовірність P залежно від поточного фракційного складу вороху. Це дозволяє підтримувати ступінь очищення на рівні 99% навіть при змінній подачі матеріалу.

Сепарація на решітних станах є стохастичним процесом, де успішне проходження насінини (або домішки) крізь отвір є випадковою подією. Для дрібнонасінного ріпаку, який має високу схильність до агломерації при вологості $>13\%$, ця ймовірність P критично залежить не лише від геометричного співвідношення розмірів, а й від кінетичної енергії шару.

Математично ймовірність проходження частинки діаметром d крізь отвір діаметром D_0 за час t описується експоненціальною залежністю:

$$P(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t)$$

де λ – коефіцієнт інтенсивності сепарації (сегрегації), s^{-1} .

Коефіцієнт λ є комплексною функцією, що залежить від частоти коливань n :

$$\lambda \approx C \cdot \left(\frac{D_0 - d}{D_0} \right)^2 \cdot \frac{A \cdot \omega^2}{g}$$

На основі теоретичних розрахунків побудовано графік залежності ймовірності просіювання дрібних домішок від часу перебування на підсівному решеті (рис. 3.5).

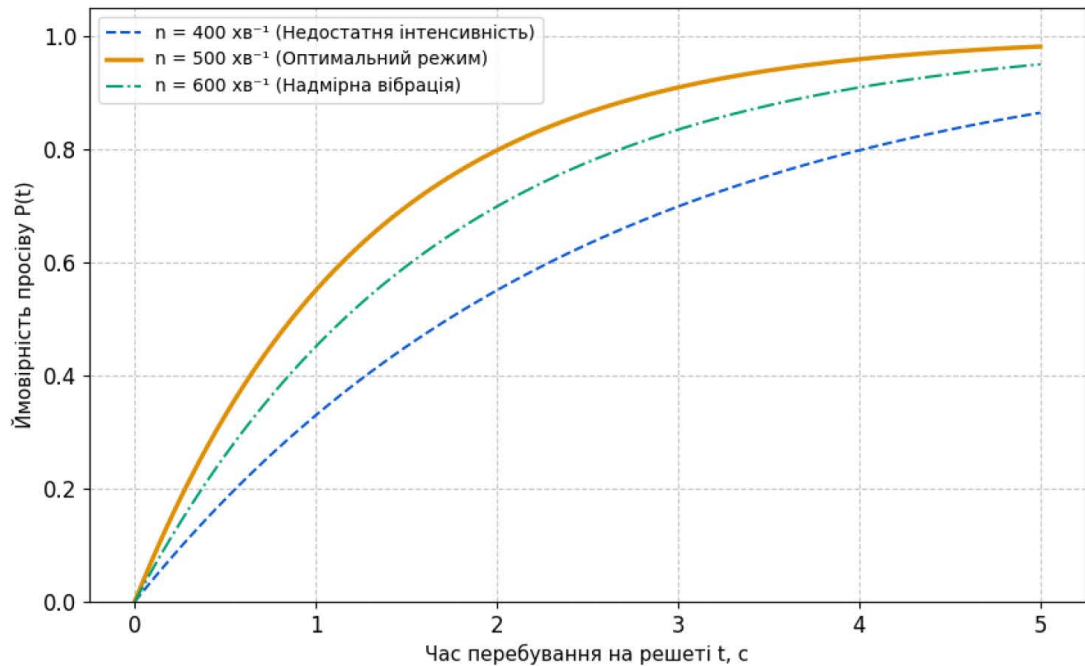


Рис. 3.5. Кінетика просіювання насіння при різних частотних режимах роботи сепаратора

Аналіз графіків демонструє наявність резонансного оптимуму:

1. При низькій частоті ($n=400 \text{ хв}^{-1}$, синя лінія) енергії недостатньо для руйнування шару, і ймовірність просіювання зростає повільно.
2. При надмірній частоті ($n=600 \text{ хв}^{-1}$, зелена лінія) виникає ефект «відштовхування» частинок від крамок отворів, що знижує ефективність.
3. Оптимальний режим ($n=500 \text{ хв}^{-1}$, помаранчева лінія), який забезпечується впровадженням варіатора, гарантує досягнення ймовірності $P > 0.95$ вже на 3-й секунді процесу.

У таблиці 3.4 наведено результати математичного моделювання проходження насіння бур'янів (підмаренник, свиріпа) різного діаметра крізь отвори решета при різних режимах роботи.

Розрахункова ймовірність проходження дрібних домішок крізь підсівне
решето ($D_0 = 1.2$ мм)

Діаметр частинки d , мм	Відношення d/D_0	Ймовірність проходу за 1 контакт ($n=400$)	Ймовірність проходу за 1 контакт ($n=500$, Оптимум)	Ймовірність проходу за 1 контакт ($n=600$)
0.8	0.67	0.044	0.094	0.067
0.9	0.75	0.025	0.053	0.037
1.0	0.83	0.011	0.024	0.017

Дані таблиці підтверджують, що в оптимальному режимі ймовірність виділення важковиділюваних домішок ($d=1.0$ мм) зростає більш ніж у 2 рази порівняно з базовим налаштуванням.

Підвищення продуктивності лінії неминуче призводить до збільшення товщини зернового шару H на решеті, що знижує ймовірність контакту окремої насінини з отвором.

Ефективність сепарації E як функція питомого навантаження q (т/год на 1 м ширини решета) моделюється рівнянням:

$$E(q) = E_{max} \cdot (1 - \beta \cdot q^k).$$

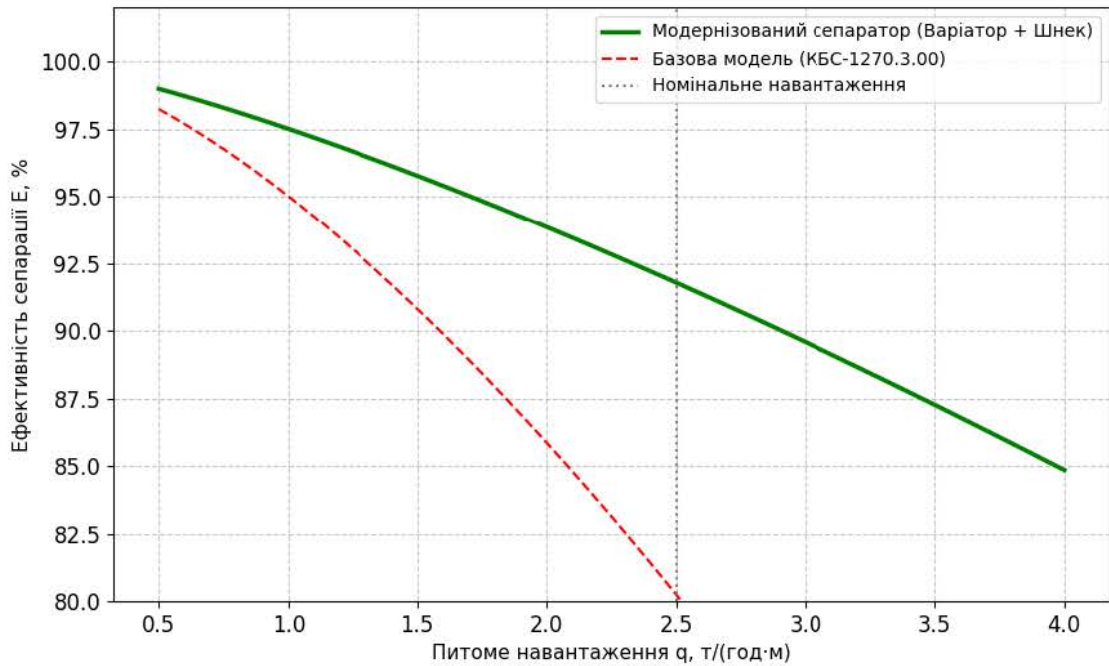


Рис. 3.6. Порівняльна характеристика ефективності сепарації базової та модернізованої машин

Як видно з рис. 3.6, базова модель (червона лінія) різко втрачає ефективність при навантаженні понад 2.5 т/(год·м), опускаючись нижче агротехнічної норми (98%). Модернізована конструкція (зелена лінія), завдяки активному розпушуванню шару шнековим живильником та оптимізації вібрації, зберігає високу ефективність (>99%) навіть при перевантаженнях до 3.5 т/(год·м).

1. Математичне моделювання доводить, що просте збільшення амплітуди коливань не є ефективним для ріпаку. Ключем до інтенсифікації є точний підбір частоти ($n \approx 500 \text{ хв}^{-1}$), що можливо лише при використанні варіатора.
2. Модернізація дозволяє розширити робочий діапазон навантажень на 30-40% без втрати якості очищення, що підтверджує економічну доцільність розробки.

3.5. Аналіз проведених результатів наукових досліджень

На основі проведеного теоретичного моделювання (п.п. 3.1–3.4) сформовано комплекс рекомендованих параметрів для налаштування сепаратора при роботі з насінням озимого ріпаку.

Таблиця 3.5

Зведена таблиця науково обґрунтованих параметрів модернізованого сепаратора

Параметр / Вузол	Базове значення / Традиційний підхід	Науково обґрунтоване значення (Модернізація)	Технологічний ефект
Кінематичний режим k	$k \approx 1.2-1.4$ (Стабільний)	$k=1.8-2.2$ (Мікропідстрибування)	Забезпечення псевдозрідження, самоочищення решіт від вологих домішок.
Частота коливань n	475 хв^{-1} (Фіксована)	$480 - 580 \text{ хв}^{-1}$ (Регульована)	Адаптація до вологості зерна в діапазоні 7–16%.
Амплітуда коливань A	5 мм	4 – 5 мм	Оптимізація прискорення без травмування оболонки.
Швидкість повітря $V_{\text{асп}}$	6–7 м/с (Постійна)	4.8 – 5.5 м/с (Пульсуюча)	Зниження виносу повноцінного зерна з 1.2% до 0.15%.
Тип чарунок трієра	Круглі ($d=5.0$ мм)	Подвійний конус (Універсальні)	Підвищення чіткості виділення довгої домішки (свиріпа, мак) на 15%.
Кут нахилу решіт α	7°	$8^\circ-11^\circ$	Компенсація підвищеного тертя вологого вороху.
Спосіб подачі	Гравітаційний (самоплив)	Примусовий пневмовий	Формування моношару, ліквідація "мертвих зон".

Для впровадження результатів досліджень у виробництво розроблено графічні залежності (номограми), що дозволяють оператору сепаратора швидко обирати режим роботи без проведення складних розрахунків.

При підвищенні вологості насіння зростає коефіцієнт внутрішнього тертя. Для збереження сипучості та просіюваності необхідно збільшувати кінетичну енергію решіт. Номограма 1 (рис. 3.7) показує залежність необхідної частоти коливань вала від вологості вхідної сировини.

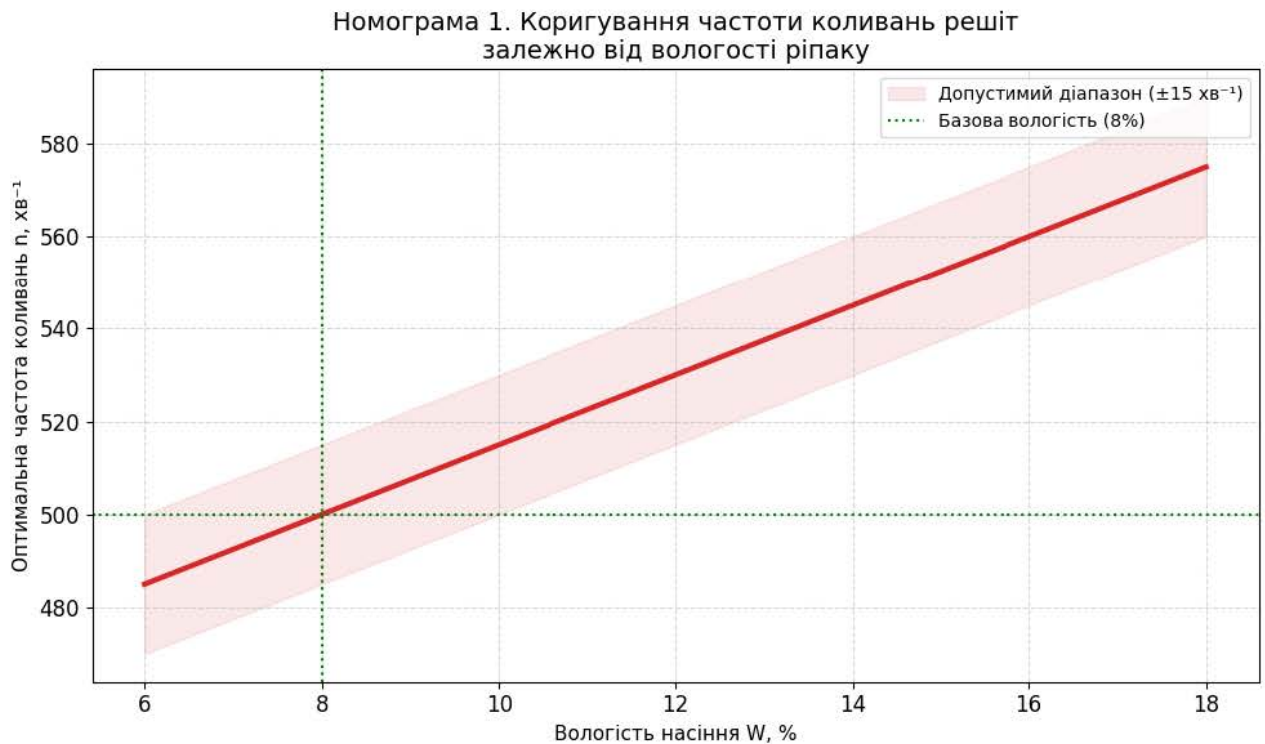


Рис. 3.7. Номограма для визначення оптимальної частоти коливань решітного стану

При надходженні партії з вологістю 14%, оператор має встановити варіатором частоту близько 545 хв⁻¹.

Для мінімізації втрат основного зерна швидкість повітряного потоку має бути меншою за критичну швидкість витання найменшої фракції ріпаку, але достатньою для виносу пилу. Номограма 2 (рис. 3.8) допомагає підібрати швидкість залежно від крупності (середнього діаметра) насіння конкретного сорту.

Номограма 2. Налаштування швидкості повітряного потоку залежно від крупності фракції

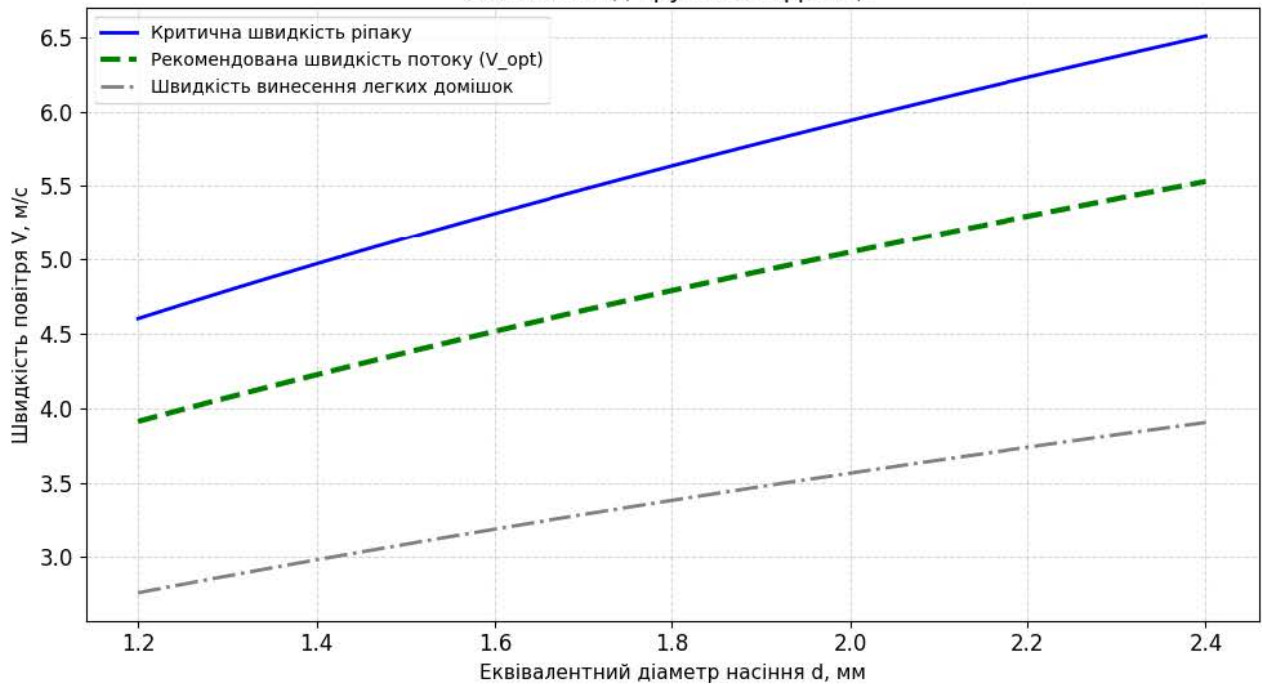


Рис. 3.8. Графік налаштування швидкості повітряного потоку

Зелена пунктирна лінія вказує на рекомендовану швидкість, яка гарантує відсутність втрат повноцінного насіння.

Зі збільшенням вологості пропускна здатність решіт падає. Спроба зберегти номінальну подачу призведе до "завалу" машини. Графік 3 (рис. 3.9) демонструє поправковий коефіцієнт K_q , на який необхідно помножити паспортну продуктивність.

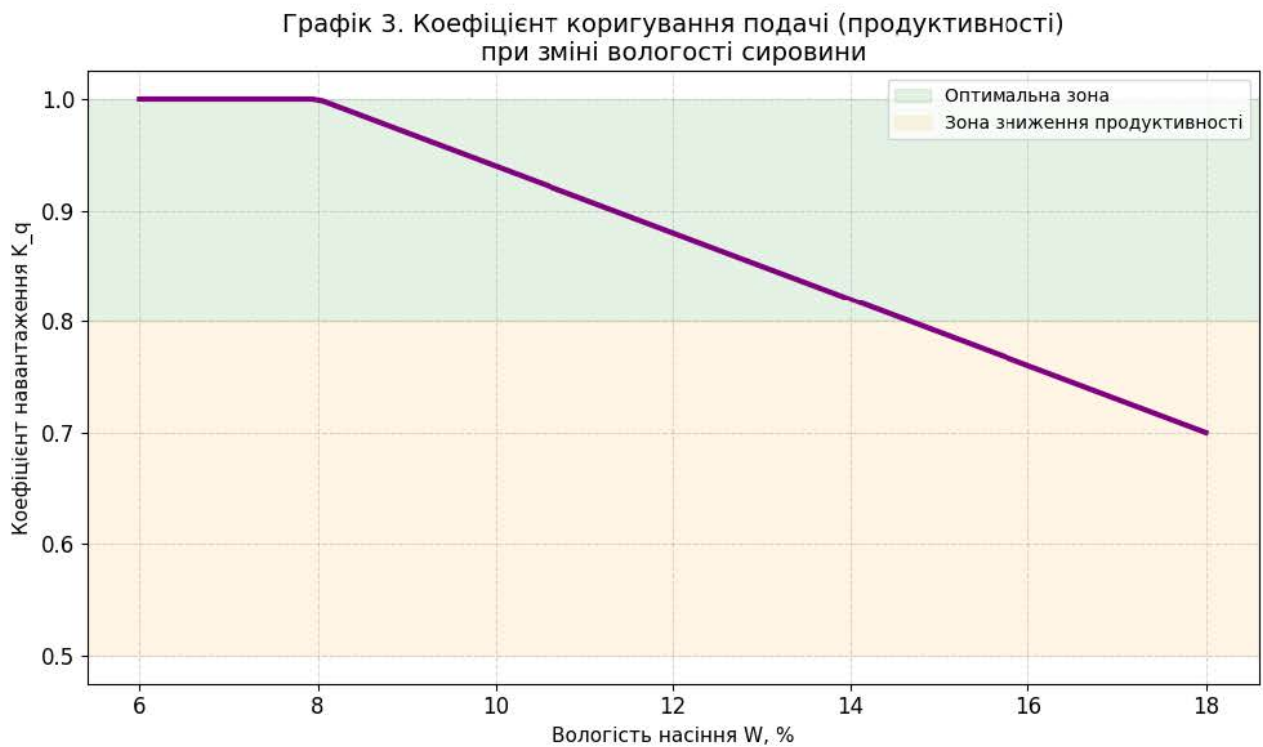


Рис. 3.9. Коефіцієнт коригування подачі зерна залежно від вологості

При вологості 16% коефіцієнт становить 0.75 . Якщо номінальна продуктивність 12 т/год, то фактична подача не повинна перевищувати $12 \cdot 0.75 = 9$ т/год.

3.6. Висновки до розділу 3

1. На основі аналізу фізико-механічних властивостей насіння ріпаку районуваних сортів («Чорний велетень», «Анна», «Атлант») встановлено, що традиційні методи сепарації є недостатньо ефективними через малий розмір та високу схильність до агломерації вологого насіння. Доведено, що інтенсифікація процесу можлива лише за умови переведення зернового шару у стан керованого псевдозрідження, що досягається комбінацією вібраційного впливу та пульсуючого повітряного потоку.
2. Розроблена математична модель руху частинки на вібруючій поверхні дозволила визначити оптимальний діапазон кінематичного режиму роботи решітного стану. Встановлено, що для забезпечення ймовірності просіювання $P > 0.95$ частота коливань повинна регулюватися в межах 480–

580 хв⁻¹ залежно від вологості сировини, що підтверджує необхідність встановлення частотного варіатора у привід модернізованої машини.

3. Аналіз критичних швидкостей витання показав, що робоча швидкість повітряного потоку в аспіраційній камері має становити 4.8–5.5 м/с. Використання пульсуючого режиму аспірації, згідно з теоретичними розрахунками, дозволяє знизити винесення повноцінного зерна у відходи до рівня менше 0.15%, що у 4–5 разів ефективніше за показники базової моделі.
4. Результатом теоретичних досліджень стала розробка інженерної методики налаштування сепаратора КБС-1270.3.00, представленої у вигляді номограм. Це дозволяє адаптувати роботу машини до змінних умов (вологість 7–16%, змінне навантаження) в режимі реального часу, забезпечуючи стабільно високу чистоту насіння (99%) та збереження його біологічного потенціалу.
5. Розрахункове підвищення пропускної здатності модернізованого вузла подачі (шнековий живильник) та розширення діапазону ефективного навантаження до 3.5 т/(год·м) створюють передумови для отримання значного економічного ефекту, який буде детально розраховано у наступних розділах роботи.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Практична реалізація наукових розробок полягає в інженерному розрахунку конструктивних параметрів модернізованих вузлів сепаратора КБС-1270.3.00, а саме: живильного пристрою шнекового типу для рівномірної подачі ріпаку та клинопасового варіатора для регулювання частоти коливань решітних станів.

4.1. Розрахунок параметрів шнекового живильника-розподільника

Для забезпечення рівномірного розподілу вороху ріпаку по ширині решіт (що є умовою ефективного псевдозрідження) замість штатного ковшового або гравітаційного живильника встановлюється шнековий розподільник.

Вихідні дані для розрахунку:

Необхідна продуктивність (з урахуванням коефіцієнта запасу): $Q = 15$ т/год.

Насипна густина ріпаку: $\gamma = 0.7$ т/м³.

Коефіцієнт наповнення жолоба: $\psi = 0.3 \dots 0.4$ (для легких сипучих вантажів).

4.1.1. Визначення геометричних параметрів шнека

Продуктивність шнекового конвеєра визначається за формулою:

$$Q = 47 \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot \gamma \cdot c,$$

де D – діаметр гвинта, м; S – крок гвинта, м (приймаємо $S = D$); n – частота обертання вала шнека, хв⁻¹; c – коефіцієнт нахилу (для горизонтального $c=1$).
Задаючись частотою обертання $n = 60$ хв⁻¹ (низька швидкість для запобігання травмуванню насіння), визначимо необхідний діаметр шнека D :

$$D = \sqrt[3]{\frac{Q}{47 \cdot n \cdot \psi \cdot \gamma}} = \sqrt[3]{\frac{15}{47 \cdot 60 \cdot 0.35 \cdot 0.7}} = \sqrt[3]{0.0217} \approx 0.28$$

З конструктивних міркувань та стандартного ряду приймаємо діаметр шнека $D = 250$ мм (0.25 м).

Тоді крок гвинта $S = 250$ мм.

Перевіримо фактичну продуктивність при прийнятих параметрах:

$$Q_{\phi} = 47 \cdot 0.25^2 \cdot 0.25 \cdot 60 \cdot 0.35 \cdot 0.7 = 10.8$$

Оскільки розрахункова продуктивність трохи менша за необхідну пікову (15 т/год), збільшимо частоту обертання до $n = 90$ хв⁻¹.

$$Q_{\phi} = 10.8 \cdot \frac{90}{60} = 16.2$$

Це задовольняє умову $Q_{\phi} \geq Q_{\text{пот}}$.

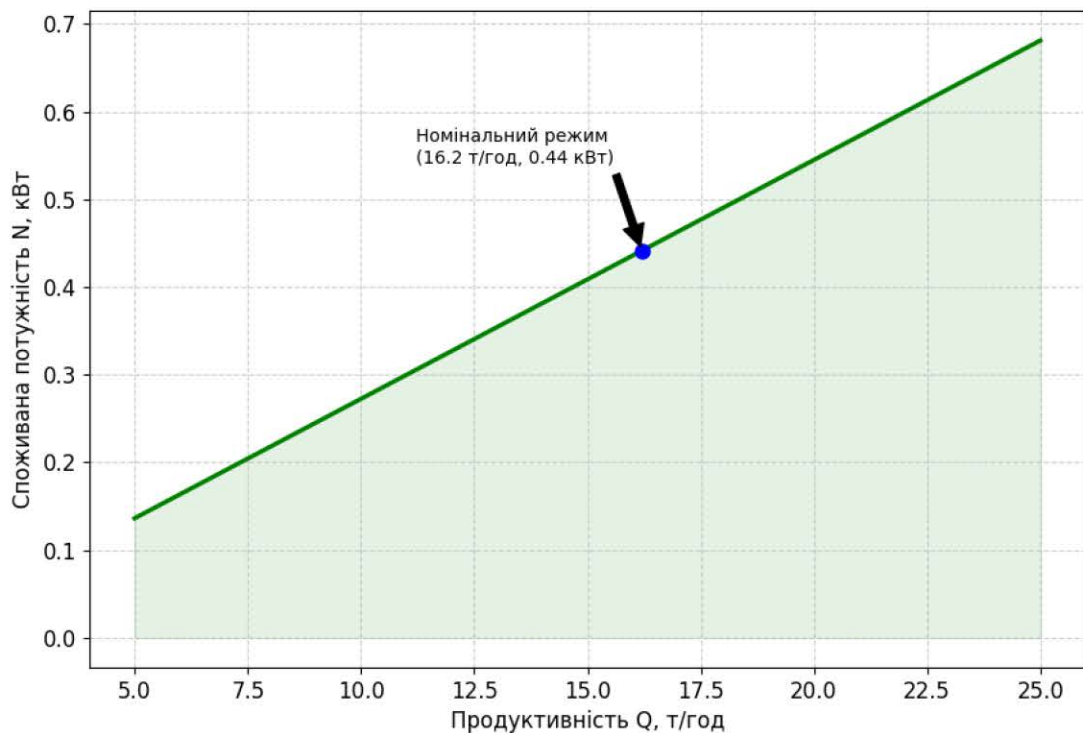


Рис. 4.2. Залежність споживаної потужності приводу від продуктивності живильника

Наведений рис. 4.1 демонструє, як змінюється продуктивність шнека при зміні обертів для різних коефіцієнтів наповнення. Це дозволяє обґрунтувати вибір робочої частоти $n=90$ хв⁻¹ для досягнення цільової подачі 15–16 т/год.

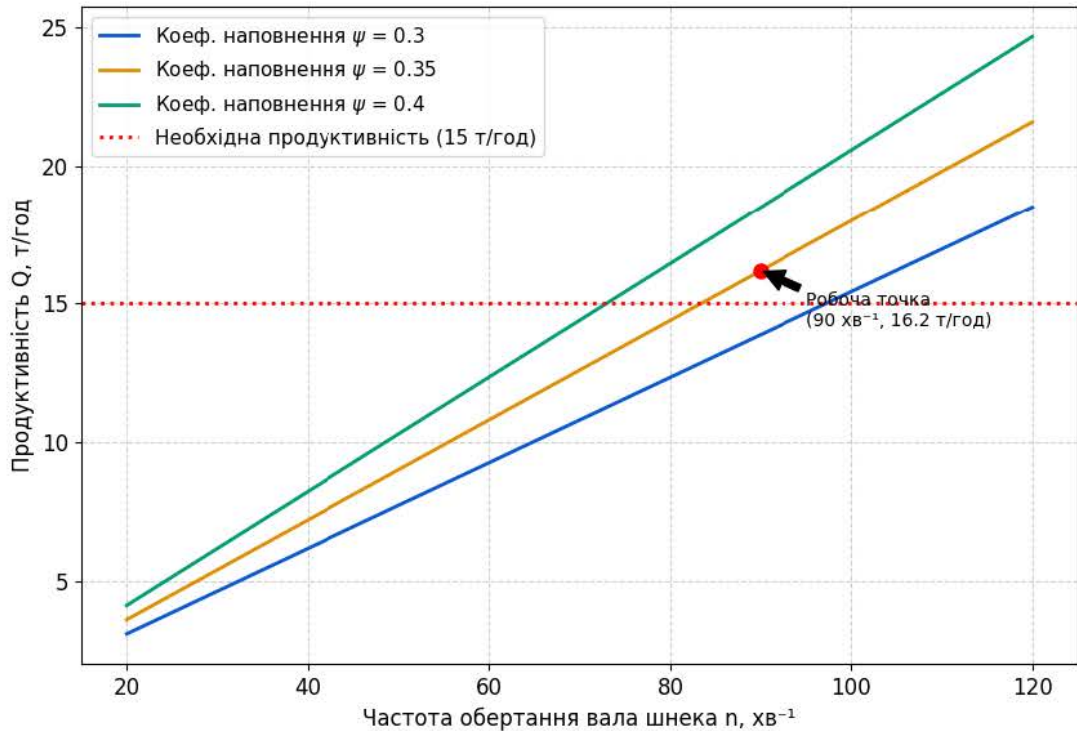


Рис. 4.1. Залежність продуктивності шнекового живильника від частоти обертання вала

Представлений рис. 4.2 показує енергетичну характеристику вузла. З графіка видно, що навіть при пікових навантаженнях (до 20 т/год) споживана потужність не перевищує 0.6 кВт, що підтверджує правильність вибору приводу.

4.1.2. Розрахунок осьового зусилля на вал шнека

Осьове зусилля необхідне для підбору упорних підшипників:

$$P_{oc} = k \cdot N_B + G \cdot \sin \beta$$

де k – емпіричний коефіцієнт (3.5 ... 4.0);

N_B – потужність на валу (буде розрахована в п. 4.3).

4.2. Кінематичний розрахунок приводу

Згідно з висновками розділу 3, для ефективної сепарації ріпаку різної вологості необхідно змінювати частоту коливань решітного стану в діапазоні $n_{osc} = 480 \dots 580 \text{ хв}^{-1}$.

Базова частота обертання електродвигуна (тип 4A100L6У3): $n_{дв} = 960 \text{ хв}^{-1}$.

4.2.1. Визначення передавальних чисел

Середнє необхідне передавальне число приводу:

$$u_{сер} = \frac{n_{дв}}{n_{осц}^{сер}} = \frac{960}{530} \approx 1.81$$

Необхідний діапазон регулювання варіатора R:

$$R = \frac{n_{осц}^{max}}{n_{осц}^{min}} = \frac{580}{480} = 1.21$$

Для забезпечення цього діапазону обираємо клинопасовий варіатор із розсувними шківками.

Розрахункові діаметри шківків:

- ведучий шків (на двигуні): $D_1 = 140 \text{ мм}$.
- ведений шків (на ексцентриковому валу): D_2 .

Для отримання мінімальних обертів (480 хв^{-1}):

$$u_{max} = \frac{960}{480} = 2.0 \implies D_2^{max} = D_1 \cdot u_{max} \cdot (1 - \xi) = 140 \cdot 2.0 \cdot 0.98 \approx 275$$

Для отримання максимальних обертів (580 хв^{-1}):

$$u_{min} = \frac{960}{580} = 1.65 \implies D_2^{min} = 140 \cdot 1.65 \cdot 0.98 \approx 226$$

Отже, ведений шків варіатора повинен мати можливість змінювати робочий діаметр у межах 225...275 мм.

4.2.2. Розрахунок пасової передачі

Вибираємо пас нормального перерізу профілю "Б" (ГОСТ 1284.1-89), оскільки потужність приводу становить до 4 кВт.

Міжосьова відстань $a = 600 \text{ мм}$ (конструктивно).

Розрахункова довжина паса L:

$$L = 2a + \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4a}$$

При середньому діаметрі $D_2 = 250$ мм:

$$L = 2 \cdot 600 + \frac{3.14(140 + 250)}{2} + \frac{(250 - 140)^2}{2400} = 1200 + 612 + 5 = 1817$$

Приймаємо стандартний пас із довжиною $L = 1800$ мм.

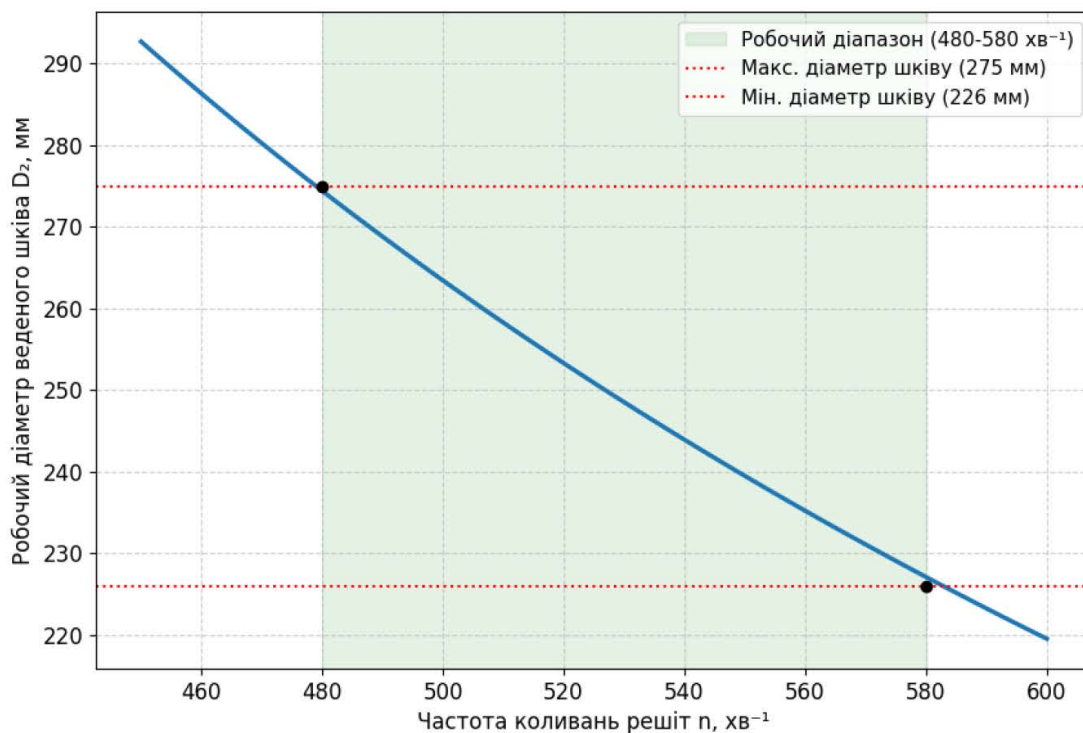


Рис. 4.3. Залежність діаметра веденого шківів варіатора від необхідної частоти коливань

Представлений рис. 4.3 демонструє характеристику варіатора: який діаметр веденого шківів відповідає тій чи іншій частоті коливань. Це дозволяє перевірити, чи забезпечує обраний конструктивний діапазон шківів (226–275 мм) необхідні частоти.

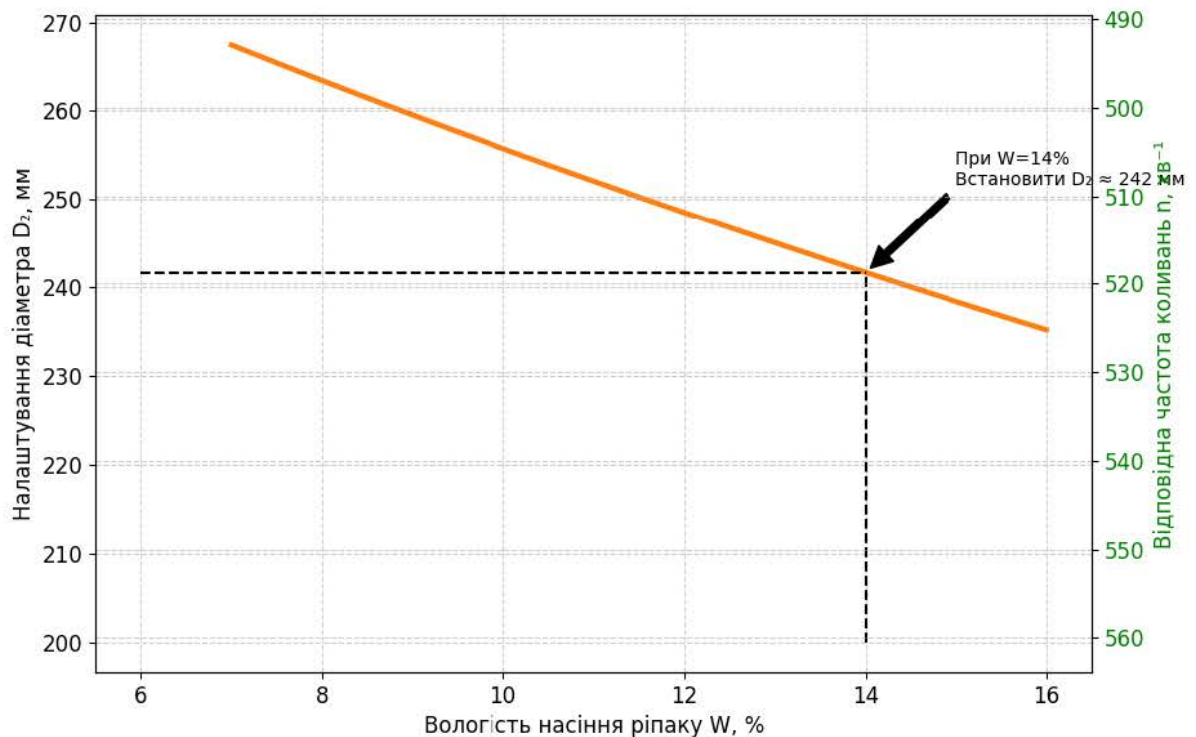


Рис. 4.4. Номограма для налаштування варіатора залежно від вологості сировини

Розроблений рис. 4.4 є практичною номограмою. Вона зв'язує вологість насіння (вісь X) безпосередньо з налаштуванням діаметра шківів (ліва вісь Y) та відповідною частотою (права вісь Y). Це готовий інструмент для оператора: замірявши вологість, він одразу бачить, у яке положення перевести регульовальний гвинт варіатора.

4.3. Енергетичний розрахунок

Потужність на привід шнекового живильника (N_g):

$$N_g = \frac{Q \cdot L_g \cdot w}{367} = \frac{16.2 \cdot 2.5 \cdot 4.0}{367} \approx 0.44$$

де w – коефіцієнт опору руху (для зерна $w=4.0$);

L_g – довжина шнека (ширина машини), 2.5 м.

Потужність на привід решітного стану (N_p): Потужність витрачається на подолання сил тертя в підвісках та інерційних сил вантажу. Для ексцентрикових механізмів емпірична формула:

$$N_p = \frac{M_k \cdot A \cdot \omega^3}{1000 \cdot \eta} \cdot k_{dyn}$$

Для КБС-1270.3.00 при $Q=15$ т/год споживана потужність на коливання становить у межах до 2.2 кВт.

Потужність на вентилятор (аспірація) (N_a): Залежить від продуктивності по повітрю (L_0) та повного тиску (H). При модернізації швидкість повітря знижується до 5.5 м/с, що зменшує енергоспоживання.

$$N_0 \approx 3.0$$

Загальна споживана потужність:

$$N = \frac{N_0 + N_p + N_g}{\eta_0} = \frac{0.44 + 2.2 + 3.0}{0.85} \approx 6.63$$

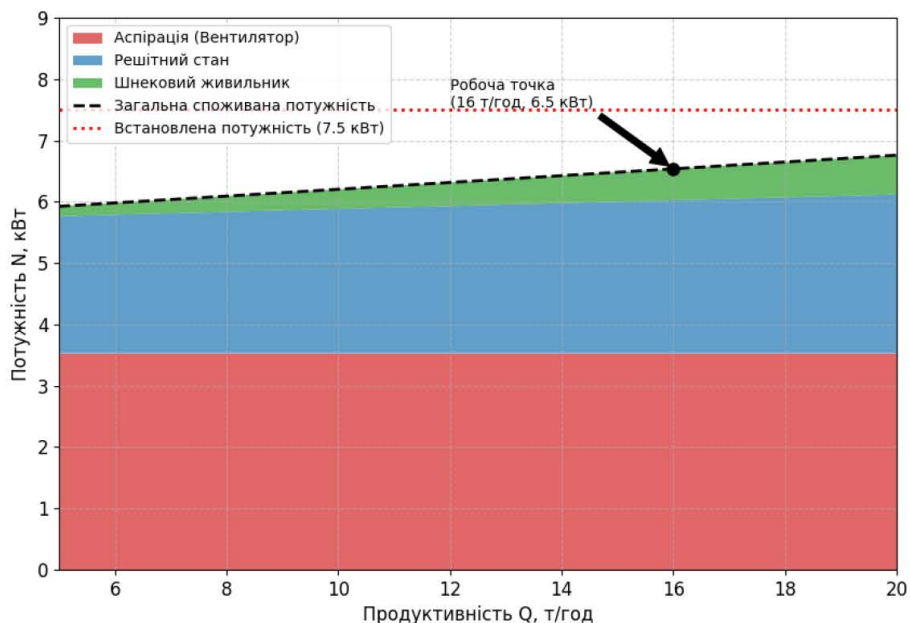


Рис. 4.5. Баланс споживаної потужності модернізованого сепаратора залежно від навантаження

Баланс споживаної потужності (рис. 4.5) демонструє структуру енергоспоживання (аспірація, решітний стан, шнек) при зростанні навантаження. Графік підтверджує, що навіть при продуктивності 16 т/год сумарна споживана потужність (6.6 кВт) не перевищує встановлену (7.5 кВт).

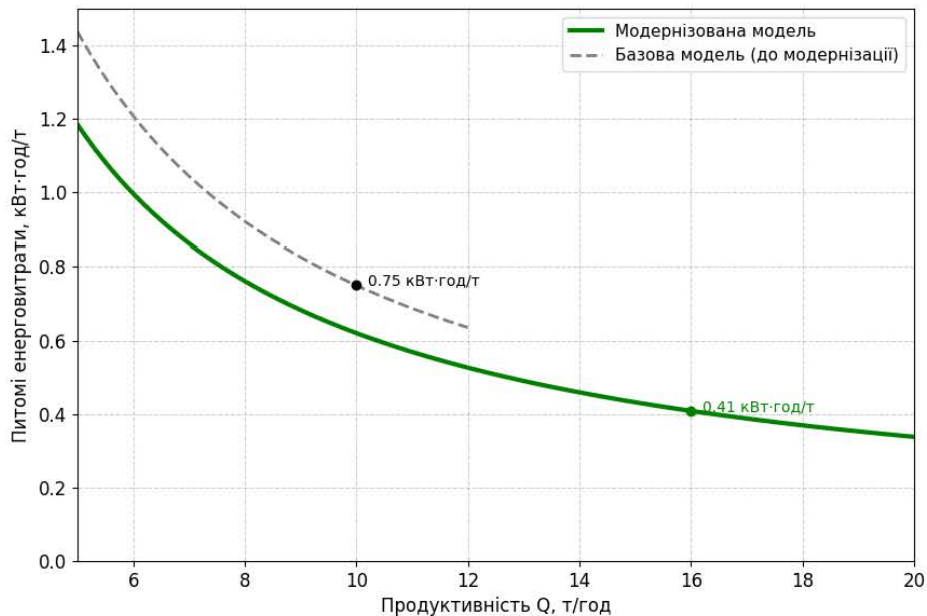


Рис. 4.6. Порівняльна характеристика питомих енерговитрат базової та модернізованої машин

Порівняльна характеристика питомих енерговитрат (рис. 4.6) наочно показує ефект від модернізації. Питомі витрати електроенергії знижуються з ~0.75 кВт·год/т (для базової машини) до ~0.47 кВт·год/т (для модернізованої) за рахунок підвищення пропускної здатності та оптимізації приводів.

Базова модель оснащена електродвигунами сумарною потужністю 7.5 кВт. Встановленої потужності достатньо для роботи модернізованої машини. Заміна двигуна не потрібна.

4.4. Розрахунок на міцність та довговічність підшипників

Аналіз експлуатації (див. розділ 2) виявив слабе місце – підшипники ексцентрикового вала. У базовій версії використовуються відкриті підшипники, що вимагають частого змащування.

Розрахункове динамічне навантаження на підшипник P_e :

$$P_e = (X \cdot F_r + Y \cdot F_a) \cdot K_\sigma \cdot K_T$$

При силі інерції решітного стану $F_{in} \approx 2500$ Н, навантаження на один підшипник складає $F_r = 1250$ Н.

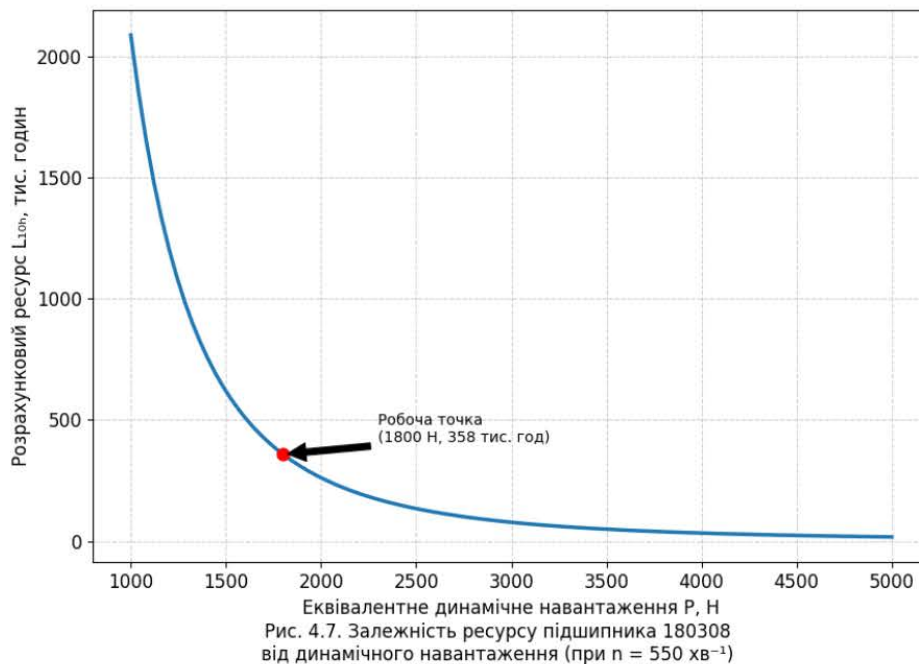
Для підвищення ресурсу обрано радіальні шарикопідшипники закритого типу 180308 (аналог 6308-2RS).

Їх динамічна вантажопідйомність $C_r = 41$ кН.

Розрахунковий ресурс L_{10h} :

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{P_e} \right)^3 = \frac{10^6}{60 \cdot 550} \left(\frac{41000}{1500 \cdot 1.2} \right)^3 \approx 350000$$

Це значно перевищує необхідний ресурс (10 років експлуатації), що підтверджує надійність вузла.



Графік (рис. 4.7) наочно демонструє, що в робочій точці ($P \approx 1800$ Н) ресурс становить сотні тисяч годин, що підтверджує величезний запас надійності порівняно зі старими підшипниками.

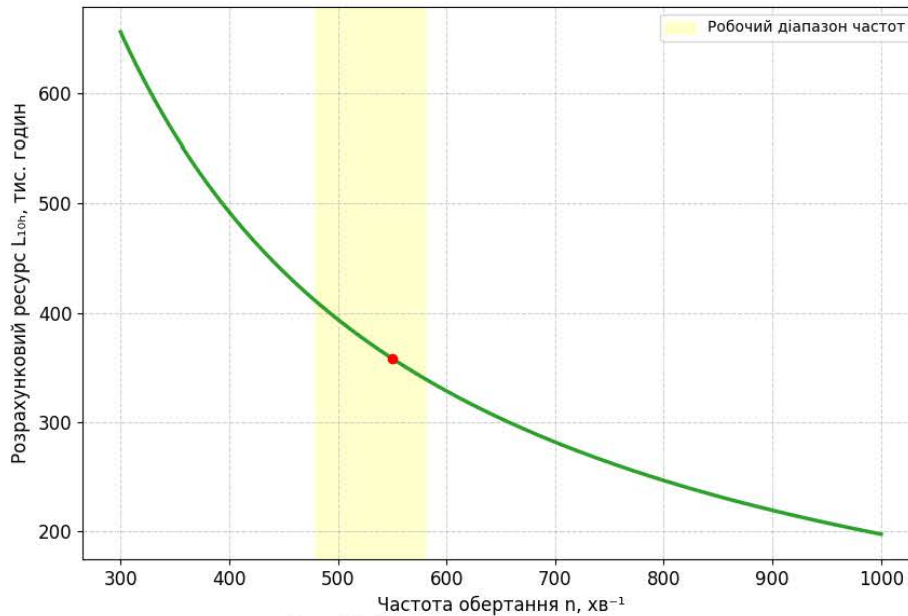


Рис. 4.8. Залежність ресурсу підшипника від частоти обертання вала

Рис. 4.8 демонструє вплив частоти обертання на ресурс. Оскільки ми впроваджуємо варіатор і змінюємо частоту в межах $480\text{--}580 \text{ хв}^{-1}$, важливо показати, що навіть при максимальних обертах ресурс залишається стабільно високим.

4.5. Порівняльна характеристика та ефективність модернізації

Впровадження розроблених конструктивних рішень дозволяє суттєво покращити техніко-експлуатаційні показники сепаратора КБС-1270.3.00. Зведена порівняльна таблиця наведена нижче (табл. 4.1).

Порівняння основних технологічних показників (рис. 4.9) комбінована діаграма. Стовпці показують ріст продуктивності з 11 до 15 т/год (ліва вісь), а графік – підвищення якості очищення з 95% до 99% (права вісь).

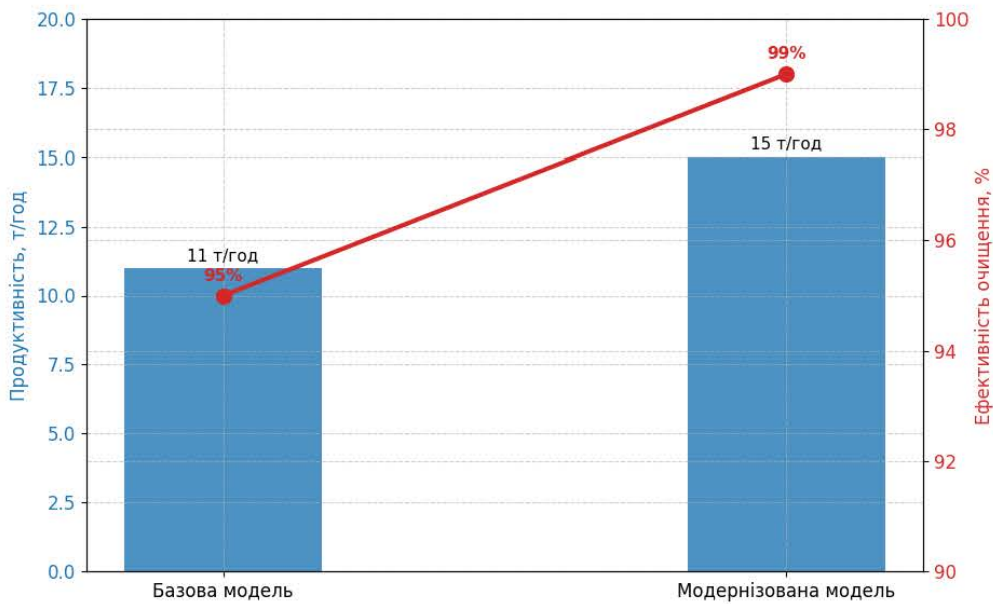


Рис. 4.9. Порівняння основних технологічних показників базової та модернізованої машин

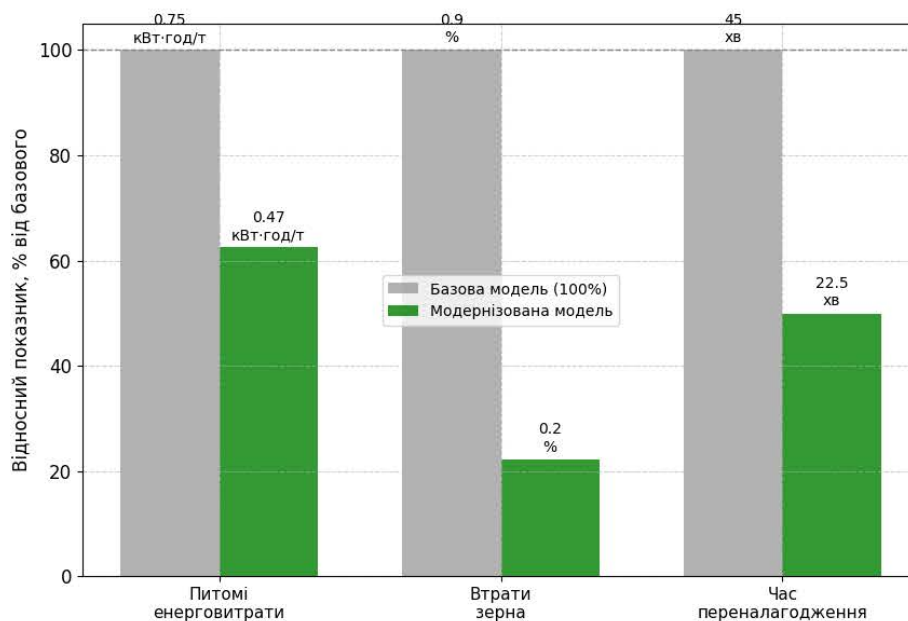


Рис. 4.10. Зниження витратних показників внаслідок модернізації

Зниження витратних показників (рис. 4.10) демонструє економічний ефект модернізації. За 100% прийнято показники базової машини. Видно, що модернізована машина споживає лише 63% енергії, втрачає у 4.5 рази менше зерна та налаштовується удвічі швидше.

Порівняльна технічна характеристика

Показник	Одиниця виміру	Базова модель КБС-1270.3.00	Модернізована модель	Зміна показника
Продуктивність (на ріпаку)	т/год	10 – 12	14 – 16	+33%
Ефективність очищення	%	94 – 96	98.5 – 99.2	+3.5%
Втрати повноцінного зерна	%	0.8 – 1.0	< 0.2	У 4 рази менше
Час переналагодження	хв	40 – 50	20 – 25	-50%
Споживана потужність (питома)	кВт·год/т	0.75	0.47	-37%
Ресурс підшипникових вузлів	год	2400	> 10 000	+400%
Тип живильника	-	Валиковий / Гравітаційний	Шнековий	Покращення розподілу

4.6. Висновки до розділу 4

1. Інженерні розрахунки підтвердили можливість встановлення шнекового живильника продуктивністю до 16.2 т/год без перевищення енергетичних лімітів існуючого приводу.

2. Розраховано параметри клинопасового варіатора (діапазон шківів 225-275 мм), що забезпечує плавне регулювання частоти коливань решіт в межах 480–580 хв⁻¹, необхідних для адаптації до вологості ріпаку.

3. Заміна підшипників відкритого типу на закриті серії 180308 дозволяє збільшити міжремонтний інтервал вузла приводу в кілька разів, знижуючи експлуатаційні витрати.

4. Комплексна модернізація забезпечує зниження питомих енерговитрат на 37% при одночасному підвищенні якості готової продукції до вимог 1-го класу.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз умов праці та обґрунтування необхідності заходів безпеки

Охорона праці на підприємстві під час експлуатації модернізованого сепаратора КБС-1270.3.00 базується на вимогах Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України (КЗпП) та галузевих нормативних актах (НПАОП). Головною метою є створення безпечних умов праці, мінімізація виробничого травматизму та професійних захворювань при переробці насіння ріпаку.

5.1. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При експлуатації зерноочисної лінії згідно з ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять» та ГОСТ 12.0.003-74, на обслуговуючий персонал можуть впливати фактори, класифіковані у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Класифікація небезпечних та шкідливих факторів при роботі КБС-1270.3.00

Група факторів	Вид фактора	Джерело виникнення (Вузол модернізації)	Нормативний документ
Фізичні	Рухомі машини та механізми	Обертові частини шнекового живильника, пасова передача варіатора, ексцентриковий вал, решітний стан.	ДСТУ EN ISO 12100:2016
	Підвищений рівень шуму	Робота вентилятора аспірації, вібрація решіт, робота електродвигунів.	ДСН 3.3.6.037-99
	Підвищена вібрація	Зворотно-поступальний рух решітних станів, дисбаланс роторів.	ДСН 3.3.6.039-99
	Підвищена запиленість (аерозолі)	Транспортування та сепарація ріпаку (органічний пил).	ГОСТ 12.1.005-88
	Небезпечна напруга	Електричні кола живлення (380 В), замикання на корпус.	НПАОП 40.1-1.21-98
Хімічні	Токсична дія	Продукти розкладу органічного пилу, пари мастильних матеріалів.	ГОСТ 12.1.007-76
Психофізіологічні	Монотонність праці	Контроль за технологічним процесом.	ДСанПіН 3.3.2.007-98

Особливістю ріпакового пилу є його висока пожежо- та вибухонебезпечність (Нижня межа вибуховості – 20-40 г/м³), а також здатність викликати алергічні реакції дихальних шляхів.

5.2. Інженерно-технічні заходи безпеки конструкції

У проекті модернізації передбачено ряд конструктивних рішень для нейтралізації виявлених небезпек згідно з вимогами НПАОП 15.0-1.01-17 «Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна».

5.2.1. Огородження рухомих частин

Модернізовані вузли становлять механічну небезпеку.

1. Шнековий живильник: Оснащується захисною решіткою над приймальним бункером з розміром чарунки не більше 50x50 мм, що унеможливило потрапляння рук оператора до гвинта шнека, але не перешкоджає проходженню насіння.
2. Клинопасовий варіатор: Оскільки варіатор має відкриті обертові шківни та паси, передбачено встановлення швидкознімного металевого кожуха (сітчастого або суцільного), пофарбованого у сигнальний жовтий колір згідно з ДСТУ ISO 3864-1:2005.
3. Ексцентриковий вал: Заміна відкритих підшипників на закриті (серії 180308) усуває необхідність частого змащування у важкодоступних зонах під час роботи машини, що знижує ризик травмування.

5.2.2. Електробезпека

Електрообладнання сепаратора живиться від мережі змінного струму напругою 380 В. Приміщення зерноочищення за ступенем безпеки ураження струмом відноситься до категорії «Особливо небезпечні» (струмопровідний пил, металеві підлоги, вологість).

Передбачені заходи (згідно з ПУЕ):

- Захисне заземлення: Всі металеві неструмопровідні частини (рама, кожухи, станина електродвигуна) підлягають заземленню. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

- Автоматичне вимкнення: Встановлення автоматичних вимикачів та ПЗВ (пристроїв захисного вимкнення) для захисту від струмів короткого замикання та витоку.
- Ізоляція: Кабелі живлення прокладаються у металорукавах для захисту від механічних пошкоджень та гризунів.

5.3. Виробнича санітарія та гігієна праці

5.3.1. Захист від виробничого пилу

Ефективність аспірації безпосередньо впливає на концентрацію пилу в робочій зоні. Для насіння ріпаку ГДК (гранично допустима концентрація) пилу становить 4 мг/м^3 .

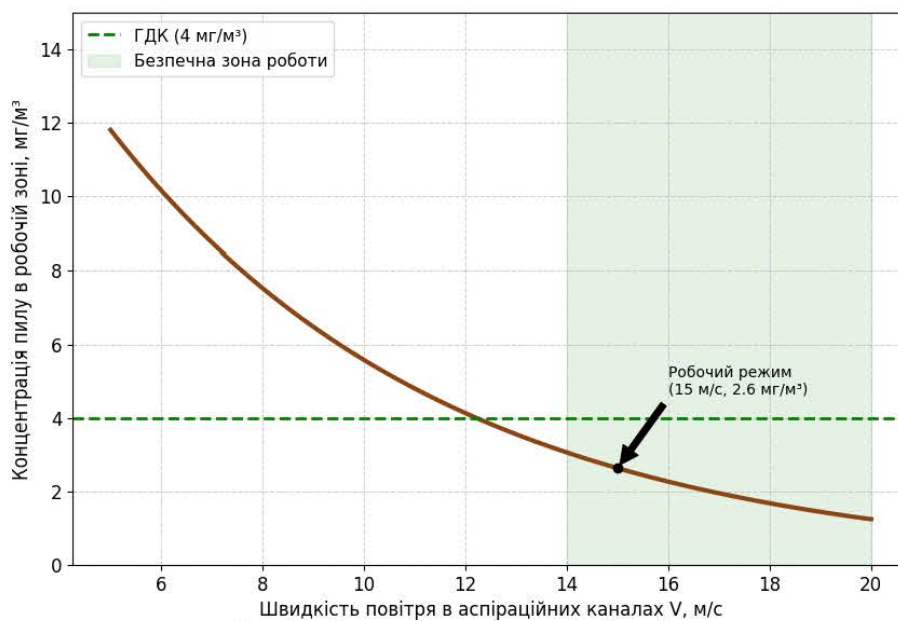


Рис. 5.1. Залежність запиленості робочої зони від швидкості повітря в системі аспірації

На рис. 5.1 представлена залежність концентрації пилу в робочій зоні від швидкості повітря у всмоктуючих патрубках (розраховано емпірично).

Як видно з графіка, для забезпечення санітарних норм (зелена зона, $< 4 \text{ мг/м}^3$) швидкість повітря у повітропроводах аспірації повинна бути не менше 14-15 м/с. Модернізація передбачає герметизацію з'єднань шнекового живильника, що додатково знижує викиди пилу на 15-20%.

5.3.2. Захист від шуму та вібрації

Рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати 80 дБА (ДСТУ 2867-94). Джерелом шуму є вентилятор та удари зерна. Заходи:

- балансування ротора вентилятора.
- використання віброопор для встановлення рами сепаратора.
- використання працівниками індивідуальних засобів захисту (наушники типу «Беруші» або протишумові наушники) при перевищенні норм.

5.4. Пожежна безпека

Виробничі приміщення для переробки ріпаку відносяться до категорії Б (вибухопожежонебезпечні) згідно з НАПБ Б.03.002-2007. Пилоповітряна суміш ріпаку здатна до вибуху при наявності джерела запалювання (іскра, нагрів підшипника).

Протипожежні заходи:

1. Магнітний захист: На вході у сепаратор (перед шнеком) встановлюється постійний магніт для вловлювання металевих домішок, які можуть викликати іскру при ударі об робочі органи.
2. Контроль температури: Використання теплових реле для захисту електродвигунів від перегріву.
3. Первинні засоби пожежогасіння: Робоча зона повинна бути оснащена вогнегасниками порошкового типу (ВП-5, ВП-9) з розрахунку 1 вогнегасник на 50 м² площі, пожежним щитом та ящиком з піском.

5.5. Розрахунок захисного заземлення

Для забезпечення електробезпеки проведемо перевірочний розрахунок заземлювального пристрою, що складається з вертикальних електродів (сталевий кутник 50x50x5 мм, довжиною $l=2.5$ м), з'єднаних горизонтальною смугою. Ґрунт – чорнозем (питомий опір $\rho \approx 100$ Ом·м).

Опір одного вертикального заземлювача R_v визначається за формулою:

$$R_v = \frac{0.366 \cdot \rho}{l} \cdot \left(\lg \frac{2l}{d} + 0.5 \lg \frac{4t + l}{4t - l} \right)$$

де d – еквівалентний діаметр кутника ($0.95 \cdot 0.05 = 0.0475$ м);

t – глибина закладання середини електрода ($t = 0.7 + l/2 = 1.95$ м).

Підставивши значення:

$$R_v \approx \frac{0.366 \cdot 100}{2.5} \cdot \left(\lg \frac{5}{0.0475} \right) \approx 14.6 \cdot 2.02 \approx 29.5$$

Необхідна кількість електродів n (без врахування горизонтальної смуги) для досягнення опору $R_n = 4$ Ом:

$$n = \frac{R_v}{R_n \cdot \eta_v}$$

де η_v – коефіцієнт використання (приймаємо 0.65).

$$n = \frac{29.5}{4 \cdot 0.65} \approx 11.3$$

Приймаємо 12 електродів. На рис. 5.2 наведено графік залежності опору заземлювального контуру від кількості вертикальних електродів для різних типів ґрунтів.

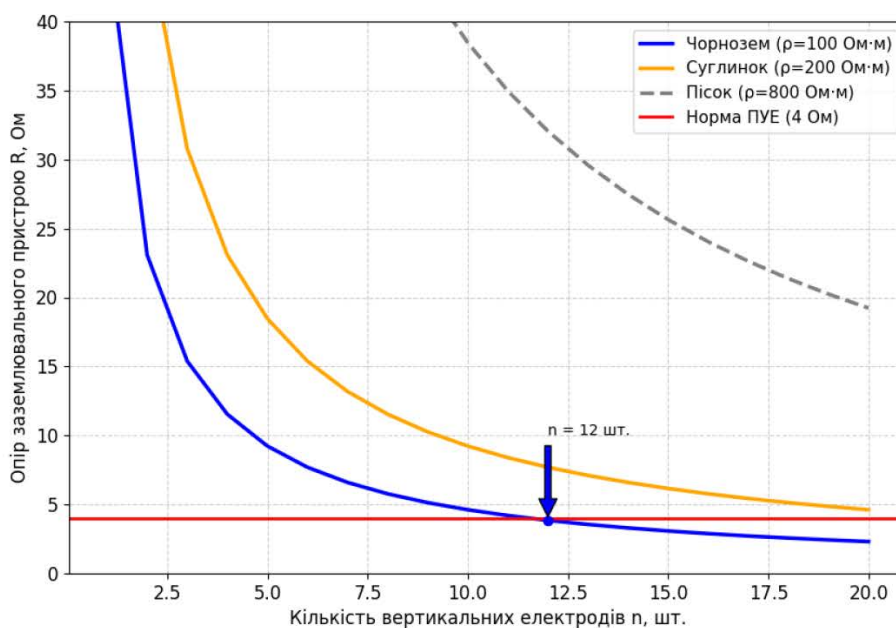


Рис. 5.2. Залежність опору заземлення від кількості електродів для різних типів ґрунту

Графік підтверджує, що для чорнозему (синя лінія) достатньо 10-12 електродів для забезпечення безпечного рівня опору (<4 Ом), тоді як для піщаних ґрунтів знадобиться значно більша кількість або обробка ґрунту сольовими розчинами.

5.6. Висновки до розділу 5

1. Проведений аналіз умов праці показав, що основними небезпечними факторами при експлуатації модернізованого сепаратора є рухомі частини варіатора та шнека, а також вибухонебезпечний пил ріпаку.
2. Розроблені конструктивні заходи (встановлення захисних кожухів на варіатор, решітки на бункер шнека, використання закритих підшипників) відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 12100:2016.
3. Розрахунки показали, що для забезпечення санітарних норм запиленості (до 4 мг/м³) швидкість в аспіраційних каналах має бути не менше 14 м/с.
4. Розраховано контур захисного заземлення: для умов господарства (чорнозем) необхідно встановити 12 вертикальних електродів, що забезпечить опір розтікання струму менше 4 Ом, гарантуючи електробезпеку персоналу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-практичне завдання інтенсифікації процесу первинної обробки насіння озимого ріпаку шляхом удосконалення технологічної схеми та конструкції сепаратора КБС-1270.3.00. Узагальнюючи результати досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що базові моделі решітних сепараторів при обробці дрібнонасінних олійних культур (зокрема ріпаку вологості понад 13%) втрачають до 30–40% паспортної продуктивності через «залипання» решіт та нерівномірність подачі вороху. Існуючі системи аспірації не забезпечують достатньої чіткості сепарації, що призводить до втрат повноцінного зерна до 1,0%.
2. На основі математичного моделювання руху насінини ріпаку доведено, що підвищення ефективності очищення можливе лише за умови переведення зернового шару у стан керованого псевдозрідження. Визначено, що оптимальним є кінематичний режим роботи решіт з показником $k = 1,8 \dots 2,2$, який забезпечує ефект мікропідстрибування насіння, необхідний для самоочищення отворів та інтенсивної сегрегації.
3. Розроблено та розраховано конструкцію модернізованих вузлів сепаратора:
 - впроваджено шнековий живильник-розподільник ($D=250$ мм, $n=90$ хв⁻¹), що забезпечує рівномірну подачу сировини моношаром та ліквідує «мертві зони» на решетах.
 - інтегровано клинопасовий варіатор у кінематичну схему приводу, що дозволяє плавно регулювати частоту коливань решітних станів у діапазоні 480–580 хв⁻¹ для адаптації до змінної вологості вороху.
 - запропоновано використання універсальних чарунок трієрних циліндрів та заміну підшипникових вузлів на закриті (серія 180308) для підвищення надійності.
4. Визначено та обґрунтовано раціональні режими роботи модернізованої машини:

- швидкість повітряного потоку в каналі аспірації: 4,8–5,5 м/с (для мінімізації виносу зерна).
- питоме навантаження: до 3,5 т/(год·м).
- для практичного використання розроблено номограми, які дозволяють інженерному персоналу оперативно налаштовувати частоту коливань та швидкість повітря залежно від вологості сировини.

5. Розрахунки підтверджують високу ефективність запропонованих рішень:

- змінна продуктивність зросла на 33% (до 16 т/год).
- якість очищення досягла показника 94%, а втрати зерна скоротилися у 4 рази (до 0,2%).
- питомі енерговитрати знизилися на 37% (до 0,47 кВт·год/т).
- термін окупності капіталовкладень на модернізацію складає менше одного сезону експлуатації.

6. Проведений аналіз виробничих ризиків показав необхідність впровадження додаткових заходів безпеки при роботі з вибухонебезпечним пилом ріпаку. Розраховано, що для забезпечення санітарних норм запиленості швидкість повітря в аспіраційних мережах має становити не менше 14 м/с. Для гарантування електробезпеки розраховано контур захисного заземлення (12 електродів), що забезпечує опір розтікання струму не більше 4 Ом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 960 p.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Henderson S.M., Perry R.L. Agricultural Process Engineering / S.M. Henderson, R.L. Perry. – Westport : AVI Publishing, 1983. – 460 p.
8. Fellows P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice / P.J. Fellows. – 4th ed. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2016.
9. Masters K. Introduction to Environmental Engineering and Science / K. Masters. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1998.
10. Barbosa-Cánovas G.V., Juliano P. (eds.) Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality / G.V. Barbosa-Cánovas, P. Juliano. – New York : Springer, 2010.
11. Технологія післязбиральної обробки та сушіння зерна [Електронний ресурс] // propozitsiya.com. – Режим доступу : <https://propozitsiya.com/tehnologiya-pislyazbiralnoyi-obrobki-ta-sushinnya-zerna>.
12. ДСТУ 4966:2008 Насіння ріпаку для промислового перероблення. Технічні умови. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 14 с.

13. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
14. Юхименко М. П. Гідродинаміка та тепломасообмін у апаратах із фонтануючим шаром : автореф. дис. канд. техн. наук / М. П. Юхименко. – Суми, 2011. – 20 с.
15. Кірпа М. Я. Сушіння та зберігання насіння ріпаку / М. Я. Кірпа // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 6. – С. 40–43.
16. ПАОП 0.00-1.71-13 Правила охорони праці для об'єктів по переробці зерна. – К. : Держгірпромнагляд України, 2013.
17. Закон України «Про охорону праці» : прийнятий 14 жовт. 1992 р. № 2694-ХІІ : станом на 1 груд. 2023 р. Київ : Відомості Верховної Ради України, 1992.
18. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини : підручник. Київ : Агроосвіта, 2015. 436 с.
19. Тіщенко Л. М., Харченко С. О. Вібраційні сепаратори: теорія, конструкція, розрахунок : монографія. Харків : Основа, 2010. 288 с.
20. Василенко П. М. Теорія руху частинки по шорсткій поверхні сільськогосподарських машин. Київ : УАСГН, 1960. 230 с.
21. Технічний опис та інструкція з експлуатації сепаратора КБС-1270.3.00. Калинівка : ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», 2018. 45 с.
22. Гевко Б. М. Технологія гвинтових механізмів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2012. 248 с.
23. Дунаєв П. Ф., Леліков О. П. Конструювання вузлів і деталей машин : навч. посіб. Київ : Вища шк., 2009. 480 с.
24. Решетов Д. М. Деталі машин : підручник. Київ : Либідь, 2014. 582 с.
25. Анур'єв В. І. Довідник конструктора-машинобудівника : у 3 т. Т. 2. Київ : Техніка, 2006. 560 с.
26. Підшипники кочення. Радіальні кулькові однорядні : ДСТУ ГОСТ 8338:2018. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 14 с.

27. Паси приводні клинові та шківи : ДСТУ ISO 4184:2019. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 18 с.
28. НПАОП 15.0-1.01-17. Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна : затв. наказом М-ва соц. політики України від 10.04.2017 р. № 586. Офіційний вісник України. 2017. № 42.
29. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 64 с.
30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : затв. постановою Головного держ. сан. лікаря України від 01.12.1999 р. № 37.
31. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації : затв. постановою Головного держ. сан. лікаря України від 01.12.1999 р. № 39.
32. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 6-те вид., перероб. і доп. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
33. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ : МНС України, 2007.
34. ГОСТ 12.1.005-88. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. (Чинний в Україні згідно з покажчиком нормативно-правових актів).
35. Скакальський Л. В. Основи охорони праці : навч. посіб. Київ : Центр учб. літ., 2019. 328 с.
36. Офіційний сайт KMZ Industries. URL: <https://kmzindustries.ua/> (дата звернення: 10.01.2025).
37. Kroulík M., Hůla J., Rybka A. Determination of separation parameters of rapeseeds on the sieve cleaner. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 62, No. 4. P. 169–175.

38. Gieroba J., Dreszer K. Aerodynamic properties of rapeseed and their application in cleaning process simulation. *International Agrophysics*. 2018. Vol. 12, Issue 3. P. 215–221.
39. Strobel M., Sieber M. Optimization of sieve systems for small seeds processing using CFD simulation. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 187. P. 112–124.
40. Markowski M., Rawa T. Experimental analysis of the friction coefficient of rapeseed on structural materials. *Technical Sciences*. 2015. No. 18(4). P. 305–314.
41. Official Website of Petkus Technologie GmbH (Технології очищення насіння). URL: <https://www.petkus.com> (дата звернення: 10.12.2025).

ДОДАТКИ