

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Механізація вирощування пшениці ярої з модернізацією
гравітаційного сепаратора»

Виконав здобувач вищої освіти IV курсу,
групи АІ-22-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____ Чухрій Антон Володимирович

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Руслан ОСІН

« ____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Анотація

Тема: «Механізація вирощування пшениці ярої з модернізацією гравітаційного сепаратора»

У роботі обґрунтовано систему механізації вирощування ярої пшениці з використанням технологій точного землеробства. Розроблено зерноочисну лінію потужністю 4,28 т/год, де завантаження сепаратора ГС-12 на 42% забезпечує прецизійну якість насіння. Науково доведено ефективність модернізації каскадно-гравітаційного сепаратора дугоподібними решетами. Впровадження відцентрової інтенсифікації підвищило продуктивність на 12% – до 560 кг/(м²·год). Визначено оптимальний кут нахилу решіт (28°), що гарантує якісне фракціонування зерна.

Ключові слова: яра пшениця, механізація, гравітаційний сепаратор, дугоподібні решета, точне землеробство, енергоефективність

Abstract

Topic: «Mechanization of spring wheat cultivation with modernization of the gravity separator»

The study substantiates the spring wheat cultivation system integrated with precision farming technologies. A grain cleaning line with a capacity of 4.28 t/h was designed, where a 42% load of the GS-12 separator ensures premium seed quality. The efficiency of upgrading a cascade-gravity separator with arc-shaped sieves is scientifically proven. The implementation of centrifugal intensification increased productivity by 12% to 560 kg/(m²·h). The optimal sieve inclination angle (28°) was determined, ensuring high-quality grain fractionation.

Keywords: spring wheat, mechanization, gravity separator, arc-shaped sieves, precision farming, energy efficiency

ЗМІСТ

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ	Сторінка
1	Вступ	
2	Аналіз технології вирощування	
3	Операційна технологія післязбирального обробітку пшениці	
4	Інженерна частина	
5	Охорона праці	
6	Загальні висновки	
-	Список використаної літератури	
-	Додатки	

1. ВСТУП

Яра пшениця посідає важливе місце в зерновому балансі України та світу. Попри дещо нижчу урожайність порівняно з озимою культурою, вона є незамінним страховим ресурсом у роки з несприятливими агрометеорологічними умовами для перезимівлі озимих [1-3]. Ефективне вирощування ярої пшениці неможливе без комплексного підходу до механізації технологічних процесів – від обробітку ґрунту до збирання врожаю та його післязбирального обробітку.

Сучасне сільськогосподарське виробництво вимагає не просто використання техніки, а інтеграції машинно-тракторних агрегатів у цілісну технологічну систему, яка відповідає конкретній системі землеробства. При цьому вибір технічних засобів безпосередньо залежить від таких чинників, як структура ґрунту, попередник у сівозміні, рельєф поля, зволоженість ґрунту та цілей агровиробника – мінімізації витрат або максимізації врожайності.

Мета цієї роботи – систематизувати підходи до механізованого вирощування ярої пшениці, визначити відповідні технічні засоби для кожного технологічного прийому та розглянути їх застосування крізь призму різних систем землеробства.

Як відомо [3, 8], ефективність вирощування починається не в полі, а на стадії післязбиральної обробки. Традиційні методи очищення часто не забезпечують необхідної фракційної однорідності, залишаючи в посівному матеріалі низькопродуктивне зерно. Саме тому гравітаційна сепарація, що базується на різниці питомої ваги насіння, є критично важливою для формування сильних сходів. Це зумовлює актуальність модернізації робочих органів сепаратора, що дозволить досягти прецизійного відбору найбільш життєздатного насіння.

					МВПЯ 00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.	Чухрій				Пояснювальна записка		Літ.	Аркуш
Перев.	Петренко							
Н.контр.	Артеменко						ЦНТУ, гр. АІ-22-1	
Затв.	Васильковський							

2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ

2.1. Агробіологічні особливості ярої пшениці та їх значення для механізації

Яра пшениця відзначається коротким вегетаційним періодом (85...110 днів залежно від сорту), що зумовлює жорсткі агрономічні вимоги до строків виконання механізованих операцій [2-4]. Найкращими попередниками в сівозміні є просапні культури (кукурудза, соняшник, цукровий буряк), зернобобові та чистий пар [3-5]. Після просапних полів необхідна більш ретельна підготовка ґрунту, що позначається на виборі ґрунтообробних машин і кількості проходів агрегатів.

Коренева система ярої пшениці інтенсивно розвивається в перші 3...4 тижні вегетації, тому якість передпосівного обробітку ґрунту й точність сівби безпосередньо визначають густоту стояння рослин і кінцеву продуктивність посіву [3-5]. Оптимальна глибина загортання насіння становить 4...6 см; відхилення на 1...2 см спричиняє нерівномірні сходи, що неможливо компенсувати жодними агрохімічними заходами.

Злакові культури чутливі до ущільнення ґрунту, тому кожен зайвий прохід техніки по полю завдає шкоди структурі орного шару. Це обумовлює прагнення до мінімізації кількості операцій та застосування широкозахватних агрегатів, здатних суміщати декілька технологічних прийомів за один прохід.

2.2. Системи землеробства та їх вплив на вибір технічних засобів

Система землеробства визначає не лише структуру сівозміни і способи управління родючістю ґрунту, але й принципові підходи до механічного обробітку. В Україні при вирощуванні ярої пшениці застосовують три основні системи: традиційну (полицева оранка), мінімального обробітку та no-till [2, 3, 6]. Кожна з них потребує принципово відмінних машин і агрегатів.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

За традиційної технології основний обробіток ґрунту передбачає оранку на глибину 20...25 см оборотними або загальними плугами з передплужниками [2, 3]. Оборотні плуги (наприклад, типу ПО-3-40, Lemken Diamant) формують вирівняну поверхню без гребенів, що спрощує подальші операції. Після оранки ґрунт піддають розпушуванню дисковими боронами типу БДВ-7 або культиваторами паровими з пружинними лапами, а безпосередньо перед сівбою – передпосівному обробітку комбінованими агрегатами (РВК-3,6, Horsch Joker), що одночасно розпушують, вирівнюють та ущільнюють ложе для насіння [7].

Перевагою цього підходу є глибоке перемішування рослинних решток, пошарове внесення добрив, знищення шкідників та збудників хвороб, що зимують у ґрунті. Недолік – значна кількість проходів агрегатів, висока витрата паливо-мастильних матеріалів (30...45 л/га) та руйнування структури ґрунту в довготривалій перспективі.

Мінімальний обробіток передбачає відмову від оранки на користь поверхневого або мілкого дискування (8...12 см) з подальшою передпосівною культивацією або безпосередньою сівбою [2, 3, 5]. Для основного обробітку використовують дискові луцильники ЛДГ-10, Amazone Catros або культиватори-чизелі Väderstad TopDown, що розпушують ґрунт без обертання пласта. Ці машини кришать рослинні рештки і рівномірно перемішують їх у верхньому шарі, сприяючи мікробіологічній активності.

Такий підхід скорочує кількість проходів до 2...3 на рік, знижує витрати пального на 35...40% порівняно з традиційною оранкою та зменшує ерозію ґрунту [3-5]. Водночас потрібна посилена увага до боротьби з бур'янами та збудниками корневих гнилей, оскільки рослинні рештки попередника залишаються близько до поверхні.

За системи no-till ґрунт не обробляють взагалі: сівба проводиться безпосередньо в стерню або подрібнені рештки попередника спеціальними сівалками прямого посіву. Для ярої пшениці при no-till застосовують сівалки

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

з дисковими або анкерними сошниками, здатними проходити крізь щільний шар мульчі, – Amazone Primera DMC, Horsch Avatar SD, Case IH Early Riser. Головні вимоги – рівномірне заглиблення сошника попри нерівну поверхню поля та чітке розміщення насіння у вологому шарі ґрунту.

No-till максимально зберігає структуру ґрунту, стимулює розвиток ґрунтової біоти, знижує витрати на обробіток до 4...8 л/га дизельного палива [6]. Проте в перші 2...4 роки переходу на цю систему спостерігається ущільнення ґрунту та погіршення водно-повітряного режиму, що потребує застосування щільовачів або глибокорозпушувачів для усунення плужної підшви.

2.3. Підготовка ґрунту – технічні засоби та регламенти

Незалежно від прийнятої системи землеробства, підготовка ґрунту є ключовим технологічним етапом, що визначає умови сівби та ранній розвиток рослин. Основні технологічні операції – основний обробіток, культивування та передпосівна підготовка, відповідають різним групам машин.

Плуги загального призначення (ПЛН-3-35, ПЛН-5-35) оснащують передплужниками для загортання рослинних решток та дернини. За роботи на важких суглинистих ґрунтах рекомендують збільшену кількість корпусів і використання двошвидкісного режиму трактора [2, 3, 7]. Чизельні плуги (ЧПН-4-4, Caterpillar Challenger) розпушують ґрунт на 35...45 см без обертання пласта, що дозволяє зруйнувати плужну підшву та покращити водопроникність [7].

Комбіновані агрегати передпосівного обробітку поєднують дискові або зубові борони, пружинні котки та вирівнювальну раму. Прикладами є АКШ-7,2 (агрегат комбінований шарнірний), АГК-4,0, АГК-5,4 та імпорتنі аналоги типу Lemken Kompaktor [7]. За один прохід вони розпушують ґрунт на 4...8 см, подрібнюють грудки, вирівнюють мікрорельєф і формують ущільнене

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

насіннєве ложе – саме те, що потрібне для рівномірного проростання насіння ярої пшениці.

Для внесення основних доз мінеральних добрив під оранку використовують розкидачі-розподільники МВУ-8Б або причіпні дискові розкидачі типу Amazone ZA-M, Bogballe серії L [7]. Норму внесення і рівномірність розподілу контролюють зважуванням або тарувальними випробуваннями перед виїздом у поле.

2.4. Сівба ярої пшениці – техніка, агрегаткування та параметри

Сівба є найвідповідальнішою операцією у технологічному ланцюзі, адже відхилення від оптимальних строків навіть на 3...5 діб знижує врожайність ярої пшениці на 0,3...0,5 т/га [4]. Оптимальний строк сівби – ранньовесняний, при прогріванні ґрунту до +5...+7 °С на глибині 10 см, у фізично стиглому стані [2-5].

Для рядкової сівби застосовують зернові сівалки СЗ-3,6А, СЗУ-3,6 або універсальні пневматичні сівалки Horsch Pronto, Amazone D9, Vaderstad Spirit 400С тощо [5, 7]. Пневматичні сівалки забезпечують вищу рівномірність висіву та меншу травматизацію насіння порівняно з механічними дисковими, що є важливим при обробці насіння фунгіцидами і протруйниками.

Норма висіву ярої пшениці становить 4,5...5,5 млн схожих насінин на гектар (150...200 кг/га) і коригується залежно від схожості насіння, стану ґрунту та строків сівби: за пізніх строків норму збільшують на 10...15% [3, 4]. Ширина міжрядь – 12,5 або 15 см; при вузькорядній сівбі з міжряддям 7,5 см врожайність може підвищуватися на 5...8% за рахунок кращого використання площі живлення.

Сівалки агрегатують з тракторами тягового класу 1,4–2 (МТЗ-80/82, МТЗ-1221, John Deere 6series). Під час роботи контролюють глибину загортання насіння (щупом або розрізом борозни), рівномірність висіву та перекриття стикових міжрядь. Ширину захвату вибирають кратно ширині

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

майбутніх обприскувачів, як правило, 12, 18 або 24 м, для уникнення огріхів при хімічних обробках [7].

2.5. Механізований догляд за посівами

Після сівби за наявності вітряної погоди та ризику втрати вологи проводять кільчасто-шпорове коткування котками ЗКШ-6, ЗКШ-6А для ущільнення насіннєвого ложа та кращого контакту зерна з ґрунтом [5, 7]. При появі ґрунтової кірки до появи сходів застосовують легке боронування сітчастими боронами БСО-4 або ротаційними мотиками. По сходах (фаза 3-4 листки) боронування середніми боронами БЗСС-1,0 в агрегаті з тракторами сприяє розпушуванню ґрунту та механічному знищенню бур'янів-малорічників.

Система захисту ярої пшениці від шкідників, хвороб і бур'янів передбачає 2...4 обприскування за сезон [2-5]. Для цього використовують причіпні штангові обприскувачі ОПШ-15-01, Amazone UF 1801, Lemken Sirius або самохідні обприскувачі типу AMAZONE Pantera 4502, John Deere R4030 з шириною захвату 24...36 м [7]. Самохідні машини з низьким тиском у шинах (до 0,8 атм) завдають меншої шкоди ґрунту при роботі по сходах.

Препарати вносять при нормі витрати робочого розчину 150...300 л/га [2-5]. Рівномірність розподілу забезпечується підбором розпилювачів (щілинні, антидрейфові) та перевіркою тиску в системі. Дедалі ширше впроваджуються GPS-керовані системи автоматичного увімкнення/вимкнення секцій штанги, що виключають подвійне перекриття на поворотних смугах і в полів складної конфігурації.

У фазі виходу в трубку – прапорцевого листка, проводять позакореневе підживлення рідкими добривами КАС-32 або водними розчинами карбаміду з нормою 80...120 кг/га д.р. азоту [3-5]. Для цього застосовують ті самі штангові обприскувачі з пенетраторними або щілинними розпилювачами, що

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зменшують опіки листя. Комбінування підживлення з фунгіцидним обробітком дозволяє скоротити кількість проходів техніки.

2.6. Збирання врожаю

Збирання ярої пшениці – найбільш напружена та технічно складна фаза виробничого процесу. Зволікання зі збиранням на 3...5 діб після настання повної стиглості зерна призводить до втрат від осипання 3...5%, а в умовах вітряної та дощової погоди – і до 10...15% [3-5].

Пряме комбайнування (у фазу повної стиглості при вологості зерна 13...15%) є основним методом. Застосовують зернозбиральні комбайни Claas Lexion 6000–8000, John Deere S-series, CASE IH Axial-Flow, «Дон-1500Б», «Славутич» [7, 9]. Ширина жатки – 6...12 м залежно від продуктивності поля. Адаптер для збирання пшениці обладнують гнучким ножом для зрізу стебел на рівні ґрунту та мотовилом із регульованою частотою обертання.

При роздільному збиранні (за підвищеної засміченості або нерівномірного дозрівання) скошування у валки провадять у фазу воскової стиглості жатками-валкоукладачами ЖВП-6, Shelbourne Reynolds, після чого валки підбирають і обмолочують комбайнами з підбирачами [7, 9]. Цей метод дозволяє поліпшити якість зерна та зменшити втрати від осипання, але потребує більше механічних ресурсів і часу.

Обмолот ведуть при регульованому зазорі між бильним барабаном і підбарабанням (8...20 мм) та частоті обертання барабана 700...1050 об/хв залежно від вологості та засміченості маси. Для рівномірного подрібнення і розподілу соломи по полю встановлюють роторні подрібнювачі-розподільники. Після збирання поле може бути залишено на мульчу (no-till) або оброблено луцильниками для прискорення розкладання соломи.

Ефективність збиральної кампанії значною мірою залежить від злагодженої роботи транспортних засобів. Для відвантаження зерна від комбайна застосовують бункери-перевантажувачі Kinze 1050, Bredal B55 або

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

прямі перевантажувальні шнеки, що дозволяють комбайнові не зупинятися на краю поля. Зерно доставляють до зерноочисно-сушильного комплексу автозерновозами ЗАЗ-130, КамАЗ-5320 або напівпричепами-зерновозами місткістю 20...35 т [7].

Для визначення маси зерна на ходу застосовують бортові ваги або зважувальні платформи на пунктах приймання. Облік потоків зерна, планування маршрутів транспорту та контроль зайнятості комбайнів дедалі частіше здійснюється через системи управління фермою (FMS) – John Deere Operations Center, Claas Telematics, CNH AFS Connect [7, 9].

2.7. Післязбиральний обробіток зерна пшениці

Зерно ярої пшениці, що надходить від комбайна, як правило, не відповідає вимогам стандарту за вологістю, засміченістю та однорідністю. Тому безпосередньо після збирання воно потребує комплексної механізованої обробки на стаціонарних або мобільних пунктах [8].

Попереднє очищення є першою операцією і проводиться одразу при прийманні зерна з транспортних засобів [8]. Ворохоочисники ОВС-25, ЗАВ-10.30 або бункери активного вентилявання БВ-25 видаляють крупні домішки, пил і частину вологого дрібного зерна, знижуючи засміченість вороху до прийняттого рівня для подальшого зберігання або сушіння. Це критично важлива операція, оскільки зволожений ворох при температурі понад +18 °С здатен розігрітися вже через 8...12 годин.

Сушіння застосовують за вологості зерна понад 14%. Для продовольчого зерна критичною межею є 14%, для насіннєвого – 13% [5, 8]. Зерносушарки шахтного типу (СЗШ-16, Меру, Brock, GSI) обробляють зерно у безперервному потоці: теплоносій (підігріте повітря) температурою 60...80 °С проходить крізь зернову масу, знімаючи 4...6% вологи за один прохід. Для насіннєвого матеріалу температуру агента сушіння обмежують до 40...45 °С, щоб не знизити схожість. Рециркуляційні сушарки (Strahl, Sukup)

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

забезпечують м'якший і рівномірніший режим, що особливо важливо при обробці насіння.

Основне очищення та сортування проводять на зерноочисних машинах – повітряно-решітних сепараторах (ЗВС-20А, Петкус К-547, Cimbria TS) і трієрах. Сепаратори відокремлюють дрібні, щуплі та легкі зернівки, пил і рослинні рештки; трієри (циліндричні або дискові) видаляють домішки, що відрізняються від зерна пшениці за довжиною, – насіння вівсюга, куکیлю, ламаних зернівок [8]. Після очищення зерно має відповідати 1...3 класу якості за ДСТУ 3768.

Зберігання очищеного і просушеного зерна здійснюється в металевих силосах або зерноскладах при температурі не вище +10 °С і вологості 13...14%. Системи активного вентилявання підтримують задані параметри мікроклімату, а датчики температури (термометрія) у режимі реального часу сигналізують про осередки самозігрівання.

Рациональна організація після збиральної обробки зерна дозволяє зберегти до 95...97% валового врожаю і забезпечити стабільну якість як продовольчого, так і насіннєвого матеріалу ярої пшениці.

2.8. Точне землеробство у механізації вирощування ярої пшениці

Сучасна механізація невіддільна від цифрових технологій точного землеробства. GPS/GNSS-навігація дозволяє вести паралельне водіння агрегатів з точністю до 2,5 см (RTK-сигнал), що виключає пропуски та перекриття при сівбі та обприскуванні [7, 9]. Застосування курсовказівника або автопілота знижує фізичне навантаження на механізатора та підвищує якість польових операцій.

Диференційоване внесення добрив (VRA – Variable Rate Application) базується на картах ґрунтової родючості, побудованих за даними сітчастого або адаптивного відбору проб. Розкидачі та сівалки, оснащені контролерами

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

VRA, змінюють норму внесення насіння чи добрив посекційно або пікселізовано відповідно до агровиробничих зон поля [5, 7].

Дрони (безпілотні літальні апарати) застосовуються для моніторингу посівів (виявлення плям хвороб, пошкоджень шкідниками, неоднорідності сходів) з побудовою індексних карт NDVI [5]. На основі цих карт формують завдання для обприскувачів або коригують плани підживлення. Агродрони з ємністю баку 10...30 л використовують для локального обприскування осередків хвороб, що знижує витрату препаратів на 40...60%.

Телематичні системи комбайнів у режимі реального часу передають дані про продуктивність, вологість зерна та втрати до диспетчерського центру, що дозволяє оперативно коригувати маршрут і режими обмолоту.

2.9. Техніко-економічне обґрунтування механізованих технологій

Вибір системи механізації повинен базуватися не лише на агрономічних критеріях, але й на техніко-економічному аналізі. Собівартість механізованих операцій при вирощуванні ярої пшениці за традиційною технологією становить орієнтовно 4500...6000 грн/га, за мінімальним обробітком – 3000...4200 грн/га, за no-till – 1800...2800 грн/га [3, 5-7]. Проте no-till потребує вищих початкових витрат на придбання спеціальних сівалок прямого посіву (від 1,5 до 4,5 млн грн залежно від ширини захвату).

Продуктивність сучасних зернозбиральних комбайнів класу 9...12 кг зерна за секунду (наприклад, Claas Lexion 8900) у раціональних умовах дозволяє збирати 200...300 га за добу. Це означає, що господарству з масивом ярої пшениці 500 га потрібно забезпечити мінімум 2...3 одиниці комбайнової техніки або залучати сезонних підрядників.

Строки окупності нової ґрунтообробної та посівної техніки при вирощуванні зернових залежать від масштабу господарства. За площі 1000...3000 га та продуктивного використання техніки 12...14 год/добу в сезон, строки окупності вітчизняних машин становлять 5-7 років, імпортних

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

– 8-12 років [1]. Кооперація господарств та спільне використання машин дозволяє суттєво скоротити ці терміни.

Висновки за розділом

Механізація вирощування ярої пшениці є комплексним процесом, що охоплює взаємопов'язані технологічні операції – від підготовки ґрунту до збирання та транспортування зерна. Ефективна система машин повинна відповідати прийнятій системі землеробства: традиційна оранка вимагає потужних плугів і численних агрегатів, мінімальний обробіток – дискових знарядь і комбінованих машин, no-till – спеціальних сівалок прямого посіву.

Запровадження технологій точного землеробства (GPS-навігації, VRA-систем, дронів і телематики) дозволяє суттєво знизити операційні витрати, підвищити якість виконання механізованих операцій та зменшити негативний вплив агровиробництва на довкілля. Оптимальний склад машинно-тракторного парку для ярої пшениці має формуватися з урахуванням масштабу виробництва, структури ґрунтів, фінансових можливостей та довгострокової стратегії господарства.

Подальші дослідження у сфері механізації вирощування ярої пшениці мають бути спрямовані на вдосконалення адаптивних алгоритмів VRA, розвиток автономних (безпілотних) ґрунтообробних і збиральних агрегатів, а також на розроблення регіональних нормативів для прийняття рішень у галузі механізованого виробництва зерна в умовах кліматичної невизначеності.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОГО ОБРОБІТКУ ПШЕНИЦІ

3.1. Агробіологічне обґрунтування післязбирального обробітку

Зерновий ворох, що надходить від комбайна, є неоднорідною багатокомпонентною сумішшю (табл. 3.1), яка містить зерно основної культури, насіння бур'янів, органічні та мінеральні домішки, щупле і биті зерна, а також значну кількість вологи [8, 9]. Тому технологічна лінія мусить забезпечити послідовне виконання ключових операцій: попереднє очищення, сушіння, основне очищення з гравітаційним сепаруванням та закладання на зберігання.

Таблиця 3.1 – Агрофізичні характеристики зернового вороху пшениці ярої

Показник	Значення	Норматив ДСТУ
Смітна домішка, %	до 8	≤ 2
Зернова домішка, %	до 10	≤ 5
Вологість вороху, %	18...22	14,0
Натура зерна, г/л	720...780	≥ 750
Маса 1000 зерен, г	35...45	—

Наведені показники свідчать про необхідність трьох взаємопов'язаних процесів: механічного очищення від домішок, теплового висушування та гравітаційного розділення за щільністю зерна. Саме наявність гравітаційного сепаратора у складі лінії суттєво підвищує якість насіннєвого матеріалу й товарного зерна.

3.2. Схема операційної технології та підбір обладнання

Операційна технологія після збирання пшениці ярої передбачає виконання наступних послідовних технологічних операцій (табл. 3.2) [8, 9]:

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.2 – Схема операційної технології після збирання пшениці
ярої

№	Операція	Обладнання	Параметри
1	Приймання зернового вороху від комбайнів, зважування	Автомобільні ваги ВАЛ-150, бункер-накопичувач $V = 30 \text{ м}^3$	Потік до 60 т/год
2	Попереднє очищення від великих і легких домішок	Ворохоочисник МПО-50А (аспіраційно-решітний)	$Q = 50 \text{ т/год}$, $N = 7,5 \text{ кВт}$
3	Транспортування до сушарки (норія)	Норія НЦ-20 (ковшовий елеватор)	$Q = 20 \text{ т/год}$, $H = 18 \text{ м}$, $N = 5,5 \text{ кВт}$
4	Сушіння зерна до кондиційної вологості 14%	Шахтна зерносушарка ЗСША-8 (14 т/год)	$Q = 14 \text{ т/год}$, витрата тепла 4200 кДж/кг вол.
5	Транспортування до зерноочисного відділення	Стрічковий конвеєр КЛС-500, норія НЦ-10	$Q = 15 \text{ т/год}$, $N = 3,0 \text{ кВт}$
6	Основне очищення: розділення за аеродинамічними властивостями та розмірами	Повітряно-решітна машина БЦС-50	$Q = 15 \text{ т/год}$, $N = 5,5 \text{ кВт}$
7	Гравітаційне сепарування: розділення за розмірами	Гравітаційний сепаратор ГС-12	$Q = 12 \text{ т/год}$, $N = 4,0 \text{ кВт}$
8	Зважування товарного зерна та закладання на зберігання	Ваги ДВП-1000, норія НЦ-10, самопливи	$N = 2,2 \text{ кВт}$
9	Зберігання зерна	Зерносклад підлоговий, силос металевий	V відпов. розрахунку

3.3. Технологічний розрахунок зерноочисно-сушильного комплексу

3.3.1. Визначення обсягу зернового вороху та добового надходження

Валовий збір зерна (маса зернового вороху, що надходить від комбайнів до пункту обробки) визначається як:

$$Q_{в.п.я.} = S_{п.я.} \cdot U_{п.я.},$$

де $S_{п.я.}$ – площа збирання, га;

$U_{п.я.}$ – врожайність зернова, т/га ($U_{п.я.} = 3,8$ т/га);

$$Q_{в.п.я.} = 180 \cdot 3,8 = 684 \text{ т.}$$

Зерновий ворох надходить з підвищеною вологістю ($W_{1п.я.} = 20\%$). Після сушіння вологість має бути $W_{2п.я.} = 14\%$. Маса зерна після сушіння (суха речовина залишається незмінною):

$$Q_{с.п.я.} = Q_{в.п.я.} \cdot (100 - W_{1п.я.}) / (100 - W_{2п.я.}),$$

$$Q_{с.п.я.} = 684 \cdot (100 - 20) / (100 - 14) = 636,3 \text{ т.}$$

Таким чином, після зниження вологості маса зерна зменшиться на $684 - 636 = 48$ т (втрата води).

Тривалість збирання пшениці ярої в умовах Кіровоградщини – 10...12 робочих днів. Приймаємо розрахунковий термін $t_{п.я.} = 10$ днів. Добовий обсяг надходження зернового вороху:

$$Q_{доб.п.я.} = Q_{в.п.я.} / t_{п.я.} = 684 / 10 = 68,4 \text{ т/добу.}$$

Тривалість роботи пункту – 16 год/добу (дві зміни). Погодинний потік:

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$q_{\text{год.п.я}} = Q_{\text{доб.п.я}} / T_{\text{зм.оч}},$$

де $T_{\text{зм.оч}}$ – тривалість роботи за добу, год;

$$q_{\text{год.п.я}} = 68,4 / 16 = 4,28 \text{ т/год.}$$

Значення $q_{\text{год.п.я}} = 4,28$ т/год значно менше продуктивності усіх одиниць обладнання лінії, що свідчить про можливість роботи одного технологічного потоку без черг та заторів.

3.3.2. Розрахунок потреби у транспортно-завантажувальному обладнанні

Кількість норій (вертикальних ковшових конвеєрів для вертикального переміщення зерна між поверхами будівлі та між машинами) визначається з умови забезпечення неперервного технологічного потоку:

$$n_{\text{НЦ}} = Q_{\text{год.л}} / q_{\text{НЦ}},$$

де $Q_{\text{год.л}} = q_{\text{год.п.я}}$ – розрахунковий погодинний потік на ділянці, т/год;

$q_{\text{НЦ}}$ – паспортна продуктивність норії, т/год.

Для ділянки «попереднє очищення → сушарка» обираємо норію НЦ-20 ($q_{\text{НЦ}} = 20$ т/год, висота подачі $H_{\text{НЦ}} = 18$ м, $N_{\text{НЦ}} = 5,5$ кВт).

Тоді

$$n_{\text{НЦ}} = 4,28 / 20 = 0,21 \rightarrow \text{приймаємо 1 норію НЦ-20.}$$

Коефіцієнт завантаження норії: $K_{\text{зНЦ}} = 4,28 / 20 = 0,21$, що свідчить про суттєвий резерв продуктивності. Однак норія є технологічно необхідним елементом лінії і не дублюється.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для горизонтального транспортування зерна від сушарки до зерноочисного відділення застосовується стрічковий конвеєр КЛС-500 ($q_{\text{КЛС}} = 15$ т/год, ширина стрічки 500 мм, $N_{\text{КЛС}} = 3,0$ кВт). Коефіцієнт використання продуктивності: $K_{\text{зКЛС}} = 4,28 / 15 = 0,29$.

3.3.3. Розрахунок зерноочисних машин

Попереднє очищення здійснюється відразу після приймання вороху та усуває грубі домішки (солому, землю, каміння), полегшуючи роботу сушарки й основних очисних машин. Обираємо ворохоочисник МПО-50А – аспіраційно-решітна машина з двома пласкими решетами.

Потрібна продуктивність ворохоочисника визначається з умови обслуговування добового надходження зерна:

$$Q_{\text{МПО}} = q_{\text{год.п.я}} \cdot K_{\text{нер}},$$

де $K_{\text{нер}} = 1,5$ – коефіцієнт нерівномірності подачі (враховує пікові надходження зерна від кількох комбайнів одночасно);

$$Q_{\text{МПО}} = 4,28 \cdot 1,5 = 6,42 \text{ т/год.}$$

Продуктивність МПО-50А: 50 т/год $\gg$ 6,42 т/год, приймаємо 1 машину, коефіцієнт завантаження $K_{\text{МПО}} = 6,42 / 50 = 0,13$, що є достатнім для забезпечення резерву при пікових навантаженнях.

Після сушіння зерно піддається основному очищенню на БЦС-50 – повітряно-решітній машині вібровідцентрового типу. Машина відділяє дрібні та великі домішки, розділяє за товщиною і шириною зерна.

Потрібна продуктивність машини основного очищення:

$$Q_{\text{осн}} = q_{\text{год.п.я}} \cdot K_{\text{нер}} = 4,28 \cdot 1,3 = 5,56 \text{ т/год.}$$

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для насіннєвого матеріалу застосовується знижувальний коефіцієнт якості $K_{як} = 0,7$, тому розрахункова продуктивність:

$$Q_{осн.р} = 5,56 / 0,7 = 7,94 \text{ т/год.}$$

Продуктивність БЦС-50: 15 т/год $\gg$ 7,94 т/год. Приймаємо 1 машину БЦС-50.

Гравітаційний сепаратор ГС-12 є ключовою машиною схеми, що забезпечує розділення зерна за розмірами.

Паспортна продуктивність машини за умовою завдання $Q_{зр} = 12$ т/год. Розрахунок необхідної кількості гравітаційних сепараторів:

$$n_{зр} = Q_{розн.зр} / q_{зр},$$

де $Q_{розн.зр}$ – розрахункова потреба в пропускній здатності сепарування, т/год.

Після основного очищення на подальше гравітаційне сепарування спрямовується основна фракція (≈ 90 % від загального потоку). Тому:

$$Q_{розн.зр} = q_{год.п.я} \cdot 0,90 \cdot K_{нер.зр} = 4,28 \cdot 0,90 \cdot 1,3 = 5,01 \text{ т/год,}$$

де 0,90 – частка зерна, що спрямовується на гравітаційний сепаратор (решта відходи очищення);

$K_{нер.зр} = 1,3$ – коефіцієнт нерівномірності подачі.

Таким чином:

$$n_{зр} = 5,01 / 12 = 0,42 \rightarrow \text{приймаємо 1 гравітаційний сепаратор ГС-12.}$$

Коефіцієнт завантаження гравітаційного сепаратору: $K_z = 5,01 / 12 = 0,42$. Це означає, що машина використовується на 42 % своєї потужності, що є нормальним: для гравітаційних сепараторів рекомендований діапазон $K_z = 0,4 \dots 0,7$ (при надмірному завантаженні знижується точність сепарації).

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.3.4. Розрахунок зерносушарки

Маса вологи, яку необхідно видалити з вороху, розраховується виходячи зі зміни вологості зерна:

$$\Delta W_{\text{вид}} = Q_{\text{в.п.я.}} \cdot (W_{1\text{п.я.}} - W_{2\text{п.я.}}) / (100 - W_{2\text{п.я.}}),$$

$$\Delta W_{\text{вид}} = 684 \cdot (20 - 14) / (100 - 14) = 47,7 \text{ т вологи.}$$

Для пшениці при зниженні вологості на 6 % ($W_{1\text{п.я.}} = 20 \% \rightarrow W_{2\text{п.я.}} = 14 \%$) питома витрата тепла становить $q_{\text{н.т.м}} = 4200$ кДж/кг видаленої вологи (нормативне значення для шахтних зерносушарок відповідно до ДСТУ та галузевих норм проектування ОНД 1-73).

Кількість вологи, що видаляється за добу:

$$\Delta W_{\text{доб.вид}} = \Delta W_{\text{вид}} / t_{\text{п.я.}} = 47,7 / 10 = 4,77 \text{ т/добу} = 4\,770 \text{ кг/добу.}$$

Добова витрата тепла на сушіння:

$$Q_{\text{тен}} = \Delta W_{\text{доб.вид}} \cdot q_{\text{н.т.м}},$$

$$Q_{\text{тен}} = 4\,770 \cdot 4\,200 = 20\,034\,000 \text{ кДж/добу} \approx 20\,034 \text{ МДж/добу.}$$

Продуктивність сушарки виражається в тонах знятої вологи за годину (або в умовних тонах за годину при зниженні вологості від 20 до 14 %).

Погодинна потреба в сушінні:

$$Q_{\text{суш.треб}} = \Delta W_{\text{доб.вид}} / T_{\text{суш}} = 4\,770 / 16 = 298 \text{ кг вол./год} \approx 0,30 \text{ т вол./год,}$$

де $T_{\text{суш}} = 16$ год – тривалість роботи сушарки за добу.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У паспортних характеристиках зерносушарок продуктивність зазвичай вказується в тонах за годину (т/год) при знятті певної кількості відсотків вологи. Перерахунок при знятті 6 % вологи продуктивність у т зерна/год:

$$Q_{суш.зерна} = Q_{суш.треб} \cdot (100 - W_{2п.я.}) / (W_{1п.я.} - W_{2п.я.}),$$

$$Q_{суш.зерна} = 0,30 \cdot 86 / 6 \approx 4,3 \text{ т/год.}$$

Обираємо шахтну зерносушарку ЗСША-8 з паспортною продуктивністю $Q_{пасп} = 14$ т/год (при знятті 6 % вологи пшениці). Кількість сушарок:

$$n_{суш} = Q_{суш.зерна} / Q_{пасп} = 4,3 / 14 = 0,31 \rightarrow \text{приймаємо 1 сушарку ЗСША-8.}$$

Коефіцієнт завантаження сушарки: $K_{з.суш} = 4,3 / 14 = 0,31$ – одна сушарка забезпечує весь обсяг сушіння з двократним резервом продуктивності.

3.3.5. Розрахунок ємності сховища зерна

Ємність зерносховища визначається виходячи з обсягу кондиційного зерна, яке надходить на зберігання, з урахуванням коефіцієнта резервування:

$$V_{скл} = Q_{с.п.я.} \cdot K_{рез.скл} / (\gamma_{п.я.} \cdot k_{нас}),$$

де $Q_{с.п.я.} = 636$ т – маса кондиційного зерна після сушіння;

$K_{рез.скл} = 1,05$ – коефіцієнт резерву ємності (5 % запас);

$\gamma_{п.я.}$ – об'ємна маса (натура) зерна пшениці, т/м³, $\gamma_{п.я.} = 0,75$ т/м³ (750 кг/м³);

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$k_{нас}$ – коефіцієнт використання ємності сховища; Для підлогового зерносховища з горизонтальним зберіганням при висоті насипу $h = 4,0$ м: $k_{нас} = 0,85$ (враховує нерівномірність насипу, проходи тощо);

$$V_{скл} = 636 \cdot 1,05 / (0,75 \cdot 0,85) = 667,8 / 0,6375 = 1047 \text{ м}^3.$$

При висоті насипу зерна $h = 4,0$ м необхідна площа підлоги:

$$F_{скл} = V_{скл} / h = 1047 / 4,0 = 262 \text{ м}^2.$$

Приймаємо типовий підлоговий зерносклад прямокутної форми $18 \times 15 = 270 \text{ м}^2$ (площа $\geq 262 \text{ м}^2$). Така будівля є стандартним типовим проектом і забезпечує необхідну ємність зберігання.

При зберіганні у вертикальних металевих силосах (наприклад, ємністю VS-500, $V_{сил} = 500$ т кожен) необхідна кількість силосів:

$$n_{сил} = Q_{с.п.я.} \cdot K_{рез.скл} / V_{сил},$$

$$n_{сил} = 636 \cdot 1,05 / 500 = 1,34 \rightarrow 2 \text{ силоси VS-500.}$$

Вибір між підлоговим складом і вертикальними силосами визначається наявними капітальними вкладеннями господарства. У даному розрахунку приймається підлоговий зерносклад 18×15 м.

3.4. Зведена відомість обладнання

Таблиця 3.3 – Зведена відомість технологічного обладнання

№	Назва обладнання	Марка	Продукт., т/год	Кількість, шт.	Потужність одиниці, кВт	Сумарна потужність, кВт
1	Ворохоочисник	МПО-50А	50	1	7,5	7,5
2	Норія	НЦ-20	20	1	5,5	5,5

					МВПЯ 00.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			

	вертикальна					
3	Зерносушарка шахтна	ЗСША-8	14	1	45,0	45,0
4	Стрічковий конвеєр	КЛС-500	15	1	3,0	3,0
5	Повітряно-решітна машина	БЦС-50	15	1	5,5	5,5
6	Гравітаційний сепаратор	ГС-12	12	1	4,0*	4,0*
7	Норія (від очисного до складу)	НЦ-10	10	1	2,2	2,2
РАЗОМ:						72,7 кВт

* – завантажувально-розвантажувальні роботи

Загальна встановлена потужність електрообладнання технологічної лінії становить 72,7 кВт. З урахуванням того, що не всі агрегати працюють одночасно з повним навантаженням, фактична споживана потужність буде нижчою і визначається коефіцієнтом одночасності роботи та завантаження.

3.5. Техніко-економічні показники

Питома витрата електроенергії на обробку 1 т зерна визначається як відношення сумарних витрат електроенергії за сезон до загального обсягу обробленого зерна:

$$E_{\text{пит}} = (P_{\text{вст}} \cdot T_{\text{роб}} \cdot K_{\text{вик}}) / Q_{\text{с.п.я.}},$$

де $P_{\text{вст}} = 72,7$ кВт – встановлена розрахункова потужність обладнання;

$T_{\text{роб}}$ – загальний час роботи лінії, год;

$K_{\text{вик}} = 0,65$ – коефіцієнт використання встановленої потужності.

Загальний час роботи:

$$T_{\text{роб}} = t_{\text{н.я.}} \cdot 16 \text{ год/добу} = 10 \cdot 16 = 160 \text{ год.},$$

тоді

$$E_{\text{пит}} = (72,7 \cdot 160 \cdot 0,65) / 636 = 11,9 \text{ кВт} \cdot \text{год/т.}$$

					МВПЯ 00.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			

Нормативний показник питомих витрат електроенергії на після-збиральну обробку пшениці становить 10...15 кВт·год/т, тому отриманий результат 11,9 кВт·год/т знаходиться в межах норми.

Кількість операторів для обслуговування лінії в одну зміну: $n_{on} = 2$ особи (оператор пункту та слюсар-оператор), при двозмінному режимі – $n_{on} = 4$ особи. Продуктивність праці:

$$P_{Pr} = Q_{с.п.я.} / (n_{on} \cdot T_{роб}) = 636 / (4 \cdot 80) = 1,99 \text{ т/люд.-год.}$$

Висновки по розділу

За результатами виконаного технологічного розрахунку операційної технології після збирання пшениці ярої на площі 180 га з урожайністю 38 ц/га встановлено наступне:

Валовий збір зернового вороху складає 684 т, маса кондиційного зерна після сушіння – 636 т. Зниження маси на 48 т обумовлено видаленням вологи при сушінні від $W_1 = 20 \%$ до $W_2 = 14 \%$. Погодинний потік зерна через пункт обробки становить 4,28 т/год при 10-добовому терміні збирання та 16-годинній добовій роботі лінії.

Підібрано та обґрунтовано комплект обладнання: ворохоочисник МПО-50А, норія НЦ-20, зерносушарка ЗСША-8, стрічковий конвеєр КЛС-500, повітряно-решітна машина БЦС-50, гравітаційний сепаратор ГС-12, норія НЦ-10. Центральна ланка технологічної схеми – гравітаційний сепаратор ГС-12 продуктивністю 12 т/год завантажений на 42 %, що забезпечує оптимальну якість гравітаційного сепарування без перевантаження машини.

Загальна встановлена потужність лінії 72,7 кВт, питома витрата електроенергії – 11,9 кВт·год/т, що відповідає нормативним значенням для механізованих зерноочисно-сушильних пунктів. Для зберігання 636 т кондиційного зерна необхідний підлоговий зерносклад площею 270 м² (18 × 15 м) при висоті насипу 4,0 м.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

4. ІНЖЕНЕРНА ЧАСТИНА

4.1. Обґрунтування модернізації

Каскадно-гравітаційні сепаратори займають особливу нішу серед зерноочисного обладнання завдяки відсутності активного привода та простоті конструктивного виконання [8, 12-14]. Вертикальна архітектура цих машин забезпечує високу ергономічність, дозволяючи раціонально використовувати виробничі площі. Важливою перевагою є також масштабованість: збільшення кількості фракцій розділення досягається без суттєвого нарощування габаритів установки.

Незважаючи на очевидні переваги, обмежене розповсюдження таких систем зумовлене недосконалістю робочих органів. Традиційні сітчасті або жорсткі пальцеві решета часто стають «вузьким місцем», що знижує загальну ефективність очищення.

Сучасні дослідження [10, 11, 13, 15-17,] вказують на значний потенціал підвищення продуктивності через оптимізацію геометрії решітних полотен. Ключовим напрямком є використання решіт без поперечних перетинок, що дозволяє максимально збільшити показник «живого» перерізу.

Серед найбільш перспективних конструктивних рішень виділяють пруткові структури через поєднання високої механічної надійності з максимальною корисною площею просіювання. Крім того, використання радіусних елементів дозволяє задіяти додаткові інерційні сили [13]. Це активізує рух зернової маси та сприяє інтенсивнішому проходженню часток крізь отвори. Застосування змінних калібрувальних шайб забезпечує точне налаштування робочого зазору під конкретну культуру, що робить обладнання дешевшим в експлуатації порівняно зі складними механічними регуляторами.

На основі проведеного аналізу пропонується впровадження каскадної системи (рис. 4.1), оснащеної дугоподібними прутковими решетами (рис.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

4.2). Таке поєднання дозволяє нівелювати традиційні недоліки гравітаційних сепараторів. Конструкція включає (рис. 4.1) живильний бункер 1, що забезпечує рівномірну подачу суміші на решітний стан. Поділ на фракції відбувається послідовно: спочатку на колосовому сегменті 2 для виділення великих домішок, а потім на підсівному сегменті 3 для дрібних фракцій.

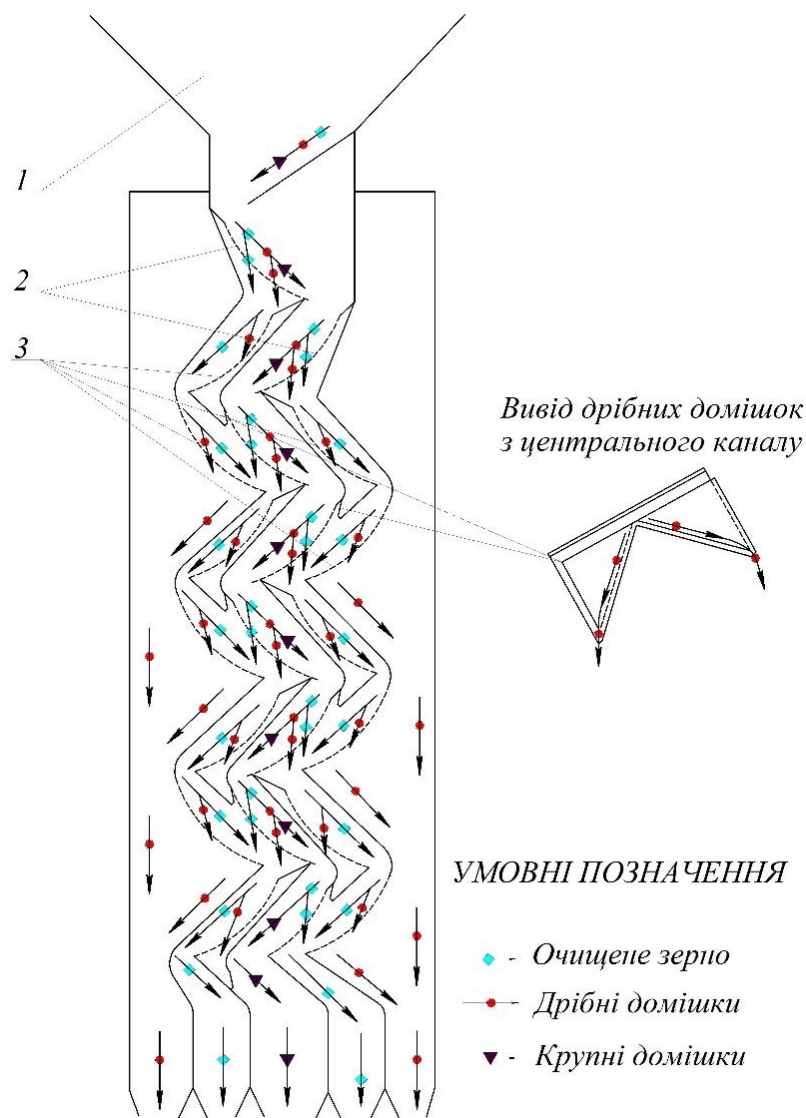


Рис. 4.1. Модель каскадного сепаратора з дугоподібними елементами

Основою робочого органу – дугового пруткового елемента (рис. 4.2), є вісь кріплення 1, на якій за допомогою розпірних шайб 2 зафіксовані пруткові елементи радіусного типу 3. Така модульна система дозволяє оперативно змінювати параметри сепарації шляхом заміни шайб різної товщини.

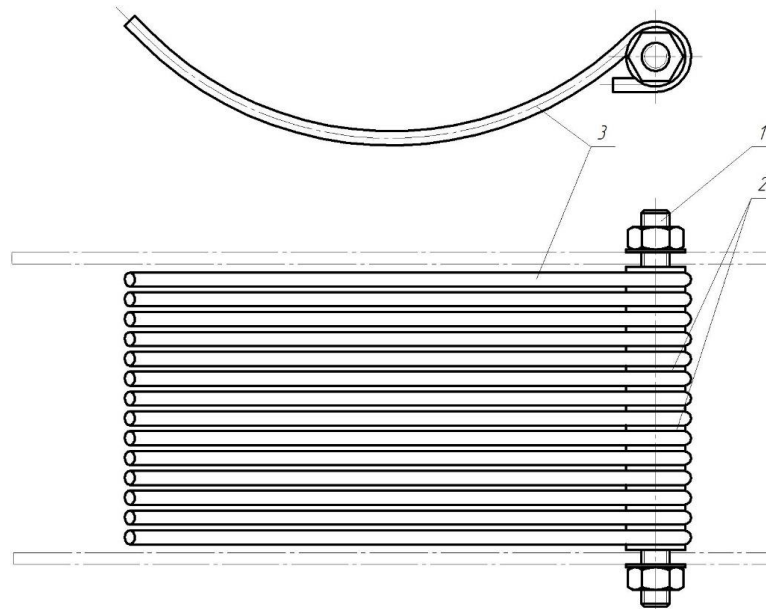


Рис. 4.2. Будова дугового пруткового елемента:

Проектування ефективної установки базується на знаходженні балансу між трьома критичними параметрами:

- якість сепарації – досягнення граничної чистоти кінцевого продукту;
- енергоефективність – мінімізація енерговитрат на одиницю обробленої маси;
- компактність – збереження мінімальних габаритів при нарощуванні кількості решітних рівнів.

Метою інженерних розрахунків є визначення конструктивних параметрів каскадно-гравітаційного сепаратора з уточненою геометрією решітних модулів: довжина дуги одного решета $L_d = 400$ мм, радіус дуги $R_d = 125$ мм. Розрахунок враховує інтенсифікуючий вплив відцентрових сил на процес сепарації та включає обґрунтування оптимального кута встановлення решіт.

4.2. Геометрія дугоподібного решітного модуля

Ключовими геометричними характеристиками дугоподібного решітного модуля є центральний кут, що відповідає дузі заданої довжини, а

також хорда та стріла підйому. Ці параметри визначають просторову компоновку каскаду та кінематику руху зернового матеріалу.

Центральний кут дуги – центральний кут φ_∂ , що відповідає дузі довжиною L_∂ при радіусі R_∂ :

$$\varphi_\partial = L_\partial / R_\partial = 0,400 / 0,125 = 3,20 \text{ рад.}$$

Хорда дуги (відстань між початковою та кінцевою точками дуги):

$$c = 2 \cdot R_\partial \cdot \sin(\varphi_\partial / 2) = 2 \cdot 0,125 \cdot 0,9996 = 0,250 \text{ м.}$$

Стріла підйому (максимальна відстань між хордою та дугою) є важливим параметром для визначення вертикального габариту одного решітного модуля в каскаді:

$$f = R_\partial \cdot (1 - \cos(\varphi_\partial / 2)) = 0,125 \cdot (1 - (-0,0292)) = 0,129 \text{ м.}$$

Кут нахилу α_p решітних секцій у каскаді є ключовим технологічним параметром, оскільки він одночасно впливає на [8-11]:

- швидкість переміщення зернового матеріалу вздовж решета і, відповідно, тривалість контакту з просіювальною поверхнею;
- значення нормальної складової реакції решета на зернівку – рушійної сили для проходження крізь щілину;
- інтенсивність відцентрових сил у дугоподібному профілі – додаткового фактору, що притискає зерно до полотна;
- компактність каскадної схеми – висоту одного ярусу та сумарну висоту машини;
- рівномірність розподілу зернового шару по ширині решета.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зерно рухається по похилому решету під дією проекції сили тяжіння вздовж поверхні. Умова усталеного руху (зерно ковзає без зупинки та без надмірного розгону):

$$a_{\text{руху}} = g \cdot (\sin \alpha_p - \mu \cdot \cos \alpha_p) \geq 0,$$

де $a_{\text{руху}}$ – прискорення зерна вздовж поверхні решета, м/с²;

α_p – кут нахилу решета до горизонту, град;

μ – коефіцієнт тертя зерна по сталевій поверхні, $\mu = 0,35$.

З умови знаходимо мінімальний кут, при якому зерно починає рухатись:

$$\text{tg}(\alpha_{\min}) = \mu \rightarrow \alpha_{\min} = \text{arctg}(0,35) = 19,3^\circ.$$

Таким чином, $\alpha_{\min} \approx 20^\circ$, при куті, меншому за 20° , зерно не буде самостійно переміщатись вздовж решета.

Час перебування зерна на решітному модулі визначає вірогідність проходу зернівки крізь щілину. Для ефективної сепарації зернова маса повинна перебувати на решеті не менше мінімально необхідного часу $t_{\min} \approx 1,5 \dots 2,5$ с. Середня швидкість руху зерна по решету при куті $\alpha_{\text{руху}}$:

$$v_{cp} = \sqrt{2 \cdot g \cdot L_{\partial} \cdot (\sin \alpha_{\text{руху}} - \mu \cdot \cos \alpha_{\text{руху}})}.$$

Час перебування зерна на одному модулі:

$$t_{cen} = L_{\partial} / v_{cp}.$$

Розраховуємо v_{cp} та t_{cen} для кількох значень кута $\alpha_{\text{руху}}$ (табл. 4.1).

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 4.1 – Розрахунок і аналіз v_{cp} та t_{cen} для кількох значень кута $a_{руху}$

Кут α , °	$\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha$	v_{cp} , м/с	t_{cen} , с	Оцінка
15°	$0,259 - 0,35 \times 0,966 = -0,080$	нема руху	—	зупинка
20°	$0,342 - 0,35 \times 0,940 = +0,013$	0,10	3,9	повільно
25°	$0,423 - 0,35 \times 0,906 = +0,106$	0,29	1,4	оптимум
30°	$0,500 - 0,35 \times 0,866 = +0,197$	0,40	1,0	добре
35°	$0,574 - 0,35 \times 0,819 = +0,287$	0,48	0,84	швидко
40°	$0,643 - 0,35 \times 0,766 = +0,375$	0,55	0,73	мало часу

При русі зерна по увігнутій дузі радіуса R_0 зі швидкістю v_{cp} виникає нормальна відцентрова сила, спрямована до центру кривизни (до поверхні решета). Це додаткове нормальне навантаження суттєво збільшує ефективний тиск зернівки на просіювальну поверхню та прискорює її орієнтацію для проходження в щілину:

$$a_{відц} = v_{cp}^2 / R_0,$$

де $a_{відц}$ – відцентрове прискорення зерна, м/с².

Коефіцієнт інтенсифікації сепарації – відношення ефективного нормального прискорення до гравітаційного:

$$k_{инт} = (g \cdot \cos a_{руху} + v_{cp}^2 / R_0) / (g \cdot \cos a_{руху}).$$

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 4.2 – Обчислення k_{int} для характерних кутів та відповідних швидкостей

Кут α , °	v_{cp} , м/с	$g \cdot \cos \alpha$, м/с ²	v_{cp}^2 / R_{∂} , м/с ²	k_{int}	Оцінка ефекту
20°	0,10	9,21	0,08	1,009	незначний
25°	0,29	8,89	0,67	1,076	помірний
30°	0,40	8,49	1,28	1,151	суттєвий
35°	0,48	8,03	1,84	1,229	значний
40°	0,55	7,51	2,42	1,322	максимальний

Вертикальний габарит одного ярусу каскаду визначається кутом нахилу та стрілою підйому модуля. Для $n_{сек} = 17$ секцій по дузі довжиною $L_{\partial} = 0,400$ м при куті $a_{руху}$:

$$H_{яр} = n_{сек} \cdot L_{\partial} \cdot \sin a_{руху} + f \cdot n_{сек},$$

де $H_{яр}$ – орієнтовна висота одного ярусу каскаду, м;

$n_{сек}$ – кількість секцій в ярусі;

Спрощена оцінка висоти ярусу (проекція на вертикаль):

$$H_{яр} \approx n_{сек} \cdot L_{\partial} \cdot \sin a_{руху}.$$

Таблиця 4.3 – Обчислення $H_{яр}$ для характерних кутів

Кут α , °	$\sin \alpha$	$H_{яр}$, м	$H_{2-ярус}$, м	Оцінка
25°	0,423	2,88	5,76 + стр.	прийнятно
30°	0,500	3,40	6,80 + стр.	прийнятно
35°	0,574	3,90	7,80 + стр.	велике
40°	0,643	4,37	8,74 + стр.	завелике

Зважаючи на всі попередні розрахунки, оптимальний кут встановлення решіт $\alpha_{opt} = 25^\circ \dots 30^\circ$. Для розрахунку приймаємо $\alpha = 28^\circ$, як компромісне значення, що одночасно гарантує:

- стійкий рух зернового матеріалу з помірною швидкістю ($v_{cp} \approx 0,35$ м/с);
- достатній час контакту зерна з решетою ($t_{cen} \approx 1,1$ с на модуль);
- коефіцієнт інтенсифікації від відцентрових сил $k_{int} = 1,13$;
- прийнятну висоту одного ярусу каскаду $H_{яp} \approx 3,21$ м.

Перерахунок для $\alpha = 28^\circ$:

$$\sin 28^\circ = 0,469; \quad \cos 28^\circ = 0,883;$$

$$v_{cp} = \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 0,400 \cdot (0,469 - 0,35 \cdot 0,883))} = 0,36 \text{ м/с};$$

$$t_{cen} = 0,400 / 0,36 \approx 1,11 \text{ с};$$

$$a_{відц} = 0,36^2 / 0,125 = 1,037 \text{ м/с}^2;$$

$$k_{int} = (9,81 \cdot 0,883 + 1,037) / (9,81 \cdot 0,883) = 1,120.$$

Таким чином, відцентрові сили збільшують ефективне притискання зерна до решета на 12,0%, що еквівалентно підвищенню питомого навантаження та продуктивності сепарації на ту ж величину.

4.3. Визначення геометричних параметрів сепаратора

Базове питоме навантаження на решето для пшениці (без урахування відцентрових сил) $q_{баз} = 500 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$.

З урахуванням коефіцієнта інтенсифікації $k_{int} = 1,12$ (відцентрові сили збільшують нормальний тиск, що прискорює орієнтацію та проходження

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зернівок крізь щілину):

$$q_{розр} = q_{баз} \cdot k_{инт} = 500 \cdot 1,12 = 560 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)},$$

де $q_{розр}$ – розрахункова питома навантага з урахуванням відцентрового ефекту, кг/(м²·год).

Необхідна сумарна площа решітного стану:

$$F_{заг} = Q_{ГС} / q_{розр},$$

де $Q_{ГС}$ – задана продуктивність, 12 000 кг/год;

$$F_{заг} = 12\,000 / 560 = 21,43 \text{ м}^2.$$

Приймаємо дворівневу каскадну схему (колосовий ярус + підсівний ярус). Площа одного ярусу:

$$F_{яр} = F_{заг} / n_{яр} = 21,43 / 2 = 10,71 \text{ м}^2,$$

де $n_{яр} = 2$ – кількість ярусів.

Приймаємо ширину решітного полотна $B_p = 1,5$ м. Необхідна довжина одного ярусу:

$$l_{яр} = F_{яр} / B_p = 10,71 / 1,5 = 7,14 \text{ м}.$$

Кількість решітних секцій (модулів) в одному ярусі при довжині дуги $L_{\delta} = 0,400$ м:

$$n_{сек} = l_{яр} / L_{\delta} = 7,14 / 0,400 = 17,85 \rightarrow \text{приймаємо } n_{сек} = 18 \text{ шт.}$$

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	N докум.	Підп.	Дата		

Фактична довжина ярусу та сумарна площа:

$$l_{\text{яр,факт}} = n_{\text{сек}} \cdot L_{\delta} = 18 \cdot 0,400 = 7,20 \text{ м},$$

$$F_{\text{факт}} = l_{\text{яр,факт}} \cdot B_p \cdot n_{\text{яр}} = 7,20 \cdot 1,5 \cdot 2 = 21,6 \text{ м}^2 > F_{\text{заг}} = 21,43 \text{ м}^2.$$

Вертикальна висота одного ярусу (проекція на вертикаль лінійного розгортання секцій):

$$H_{\text{яр}} = n_{\text{сек}} \cdot L_{\delta} \cdot \sin \alpha = 18 \cdot 0,400 \cdot 0,469 = 3,38 \text{ м}.$$

Загальна висота дворівневого каскаду (з урахуванням міжярусного простору $h_{\text{зазор}} \approx 0,4 \text{ м}$):

$$H_{\text{каск}} = n_{\text{яр}} \cdot H_{\text{яр}} + (n_{\text{яр}} - 1) \cdot h_{\text{зазор}} + h_{\text{бункер}},$$

де $h_{\text{зазор}}$ – міжярусний зазор для виходу очищеного зерна та домішок, 0,4 м;

$h_{\text{бункер}}$ – висота завантажувального бункера, $\approx 0,6 \text{ м}$;

$$H_{\text{каск}} = 2 \cdot 3,38 + 1 \cdot 0,4 + 0,6 = 7,76 \text{ м}.$$

При компактному каскадному компонуванні (секції розташовані паралельно одна під одною зі зміщенням) фактична висота машини буде становити 3,5...4,5 м за рахунок перекриття проєкцій ярусів.

4.4. Геометричні параметри пруткових решіт

Розміри щілин решіт визначаються на основі розподілу зерна пшениці за товщиною та шириною [8, 10].

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Колосове решето (видалення крупних домішок – соломи, колосків, бур'янів більших за зерно):

$$b_{\text{кол}} = k_{\text{кол}} \cdot a_{\text{ш,сеп}} = 1,20 \cdot 3,5 = 4,2 \text{ мм} \rightarrow \text{приймаємо } b_{\text{кол}} = 4,0 \text{ мм},$$

де $k_{\text{кол}} = 1,20$ – коефіцієнт прохідності зернівки;

$a_{\text{ш,сеп}} = 3,5$ мм – середня ширина прохідної зернівки.

Підсівне решето (видалення дрібних домішок – щуплого зерна, землі, піску):

$$b_{\text{нід}} = k_{\text{нід}} \cdot a_{\text{т,мін}} = 0,85 \cdot 1,8 = 1,53 \text{ мм} \rightarrow \text{приймаємо } b_{\text{нід}} = 1,5 \text{ мм},$$

де $k_{\text{нід}} = 0,85$ – коефіцієнт непрохідності зернівки;

$a_{\text{т,мін}} = 1,8$ мм – мінімальна товщина зернівки.

Діаметр прутка обирається з умови жорсткості та мінімального перекриття живого перерізу:

$$d_{\text{пр}} = k_d \cdot b,$$

де $k_d = 1,8 \dots 2,2$ – конструктивний коефіцієнт;

b – ширина щілини, мм.

Колосове:

$$d_{\text{пр,кол}} = 2,0 \cdot 4,0 = 8 \text{ мм},$$

підсівне:

$$d_{\text{пр,нід}} = 2,0 \cdot 1,5 = 3 \text{ мм}.$$

Крок між осями прутків:

$$t = d_{\text{пр}} + b,$$

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

колосове: $t_{кол} = 8 + 4 = 12$ мм;

підсівне: $t_{нід} = 3 + 1,5 = 4,5$ мм.

«Живий» переріз решета (пруткова конструкція без поперечних перетинок):

$$\varphi_{жив} = (b / t) \cdot 100\%,$$

де $\varphi_{жив}$ – відносна площа щілин (живий переріз), %;

колосове решето:

$$\varphi_{жив,кол} = (4,0 / 12) \cdot 100\% = 33,3\%,$$

підсівне решето:

$$\varphi_{жив,нід} = (1,5 / 4,5) \cdot 100\% = 33,3\%.$$

Для порівняння, штамповані решета зі стандартними круглими отворами мають живий переріз 30...45%, але з поперечними перемичками. Пруткові решета без поперечних перетинок за рахунок відсутності горизонтальних перемичок теоретично досягають живого перерізу до 100% у напрямку руху зерна, що суттєво знижує самозасмічення та збільшує пропускну здатність.

Кількість прутків у поперечному напрямку (по ширині $B_p = 1500$ мм):

$$N_{пр} = B_p / t,$$

колосове решето:

$$N_{пр,кол} = 1500 / 12 = 125 \text{ шт.}$$

підсівне решето:

$$N_{пр,нід} = 1500 / 4,5 = 333 \text{ шт.}$$

Висновки по розділу

На основі інженерних розрахунків конструктивних параметрів модернізованого каскадно-гравітаційного зерноочисного сепаратора з

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

дугоподібними прутковими решітами ($R_\delta = 125$ мм, $L_\delta = 400$ мм) для очищення пшениці продуктивністю 12 т/год встановлено.

Центральний кут дуги $\varphi = 183,3^\circ$ забезпечує увігнутий профіль, що охоплює більше півкола, хорда $c = 250$ мм, стріла підйому $f = 129$ мм. Така конфігурація реалізує максимальну зміну вектора нормальної реакції на зернівку та найвищий інтенсифікуючий ефект відцентрових сил по всій довжині дуги.

Оптимальний кут встановлення решіт $\alpha_{opt} = 28^\circ$. Кут обґрунтований аналізом трьох критеріїв: мінімальний кут руху зерна ($19,3^\circ$), достатній час контакту з решетом (1,11 с на модуль) та прийнятна висота каскаду. При $\alpha = 28^\circ$ середня швидкість зерна $v_{cp} = 0,36$ м/с, коефіцієнт інтенсифікації від відцентрових сил $k_{int} = 1,12$. Зменшення кута нижче 25° призводить до сповільнення потоку та надмірної висоти, збільшення вище 33° – до недостатнього часу сепарації.

При $v_{cp} = 0,36$ м/с та $R_\delta = 0,125$ м відцентрове прискорення $a_{відц} = 1,037$ м/с². Завдяки дузі ефективний тиск зернівки на решето збільшується на 12% порівняно з плоским решетом того ж нахилу. Це безпосередньо підвищує розрахункову питому навантагу з 500 до 560 кг/(м²·год) та скорочує необхідну площу решітного стану.

Для забезпечення продуктивності 12 т/год при $q_{розр} = 560$ кг/(м²·год) необхідна площа решіт $F_{заг} = 21,43$ м². Прийнята схема: 2 яруси решіт по 18 секцій шириною $B_p = 1,5$ м, при цьому фактична площа становить 21,6 м², а висота каскаду 7,76 м, яка за компактного компонування з паралельним розміщенням ярусів може бути зменшена до 3,5...4,5 м.

Усі розраховані елементи конструкції задовольняють вимоги міцності та надійності. Прийнятий кут $\alpha = 28^\circ$ та геометрія дуги $R_\delta = 125$ мм, $L_\delta = 400$ мм є обґрунтованим інженерним рішенням, що забезпечує максимальну ефективність сепарації при раціональних габаритних розмірах машини.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Інструкція з охорони праці при експлуатації каскадно-гравітаційного сепаратора пруткового типу [20].

1. Загальні вимоги безпеки.

До роботи з післязбирального обробітку зерна допускаються особи, що пройшли вступний інструктаж, медичний огляд та ознайомлені з особливостями конструкції пруткових решіт. Попри відсутність механічного привода в самому сепараторі, небезпеку становлять суміжні лінії подачі зерна (норії, конвеєри) та висока концентрація зернового пилу. Персонал має бути забезпечений засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): респіраторами (класу FFP2/FFP3), захисними окулярами та антиковзаючим взуттям.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи.

Оглянути кріплення пруткових елементів та розпірних шайб. Ослаблення затискних гайок на осях кріплення може призвести до руйнування каскаду під тиском зернової маси. Перевірити наявність заземлювальних пристроїв на корпусі для відведення статичної напруги, що виникає при терті зерна об сталеві прутки. Впевнитися, що майданчики обслуговування на висоті мають справні огороження, оскільки сепаратор має вертикально орієнтовані габарити.

3. Безпека під час технологічного процесу.

Категорично забороняється просовувати руки або сторонні предмети між прутки решіт під час проходження зернової маси для очищення зазорів. Зміна калібрувальних шайб або переналаштування кута нахилу дугових решіт дозволяється лише при повному припиненні подачі зерна з живильного бункера. Враховуючи відкриту конструкцію каскадних систем, необхідно стежити за справністю локальної витяжної вентиляції (аспірації), щоб запобігти утворенню вибухонебезпечної концентрації пилу.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

4. Вимоги безпеки після закінчення робіт.

Провести очищення дугоподібних прутків від застряглих домішок за допомогою спеціальних щіток. Перевірити прутки на наявність деформацій або гострих задирок, які могли виникнути внаслідок тертя. Про всі виявлені несправності (тріщини у прутках, порушення цілісності зварних швів корпусу) повідомити відповідальну особу.

5. Дії в аварійних ситуаціях.

При забиванні каскадів зерновою масою (утворенні «пробок») негайно зупинити завантажувальне обладнання. У разі виникнення пожежі (займання пилу) діяти згідно з інструкцією протипожежної безпеки, використовуючи порошкові вогнегасники.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження щодо механізації вирощування та післязбиральної обробки ярої пшениці, а також інженерного обґрунтування модернізації сепаруючих робочих органів, зроблено такі висновки.

Яра пшениця визначена як критичний стабілізаційний ресурс зернового балансу України. Встановлено, що максимальна ефективність її вирощування досягається лише за умови інтеграції технічних засобів у цілісну систему, яка адаптована до конкретної технології землеробства (від традиційної оранки до No-till) та вимог точного землеробства (GPS, VRA-системи).

На основі розрахунку операційної технології для площі 180 га обґрунтовано створення зерноочисної лінії потужністю 4,28 т/год. Ключовим аспектом є раціональне використання гравітаційного сепаратора ГС-12: його завантаження на 42% від номінальної потужності є свідомим інженерним рішенням, що дозволяє досягти прецизійної якості очищення насіння без ризику перевантаження системи. Показник питомих витрат електроенергії 11,9 кВт·год/т підтверджує енергоефективність розробленої лінії, а створена інструкція з охорони праці гарантує експлуатаційну безпеку модернізованого обладнання.

Доведено, що модернізація каскадно-гравітаційного сепаратора шляхом впровадження дугоподібних пруткових решіт ($R_0 = 125$ мм) створює ефект відцентрової інтенсифікації. Центральний кут дуги $183,3^\circ$ дозволяє змінити вектор нормальної реакції, що на 12% збільшує тиск зернівки на решето. Це підвищує питому продуктивність з 500 до 560 кг/(м²·год), дозволяючи обробляти більші обсяги зерна на менших площах решіт.

Визначено, що оптимальним кутом встановлення решіт є 28° . Саме цей параметр забезпечує оптимум між швидкістю потоку (0,36 м/с) та часом експозиції зерна на робочій поверхні (1,11 с), що є достатнім для якісного виділення фракцій за питомою вагою.

Запропонована схема з двоярусним розміщенням 18 секцій решіт забезпечує компактність установки (висота до 4,5 м) при збереженні високої загальної площі сепарації (21,6 м²).

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Афендікова Н.О. Інноваційний розвиток аграрного виробництва в сучасних умовах. Економіка та держава. 2016. с. 32-34.
2. Рекомендації по вирощуванню ярої пшениці в Лісостепу України / С.І. Мельник, В.П. Ситник, Т.І. Лазар, І.М. Войтов, Д.В. Козацький та ін. Харків, 2006. 23 с.
3. Науково-методичне забезпечення інноваційного розвитку агровиробництва в Степу України : колект. монографія / [І. М. Семеняка, О. М. Гайденко, Ю. В. Мащенко та ін.] ; за ред. Семеняки І. М., Гайденка О. М., Іщенка В. А. ; Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т сіл. госп-ва Степу. Вінниця : Нілан-ЛТД, 2021. 279 с.
4. Агробіологічні основи підвищення продуктивності ярих зернових культур у Північному Степу : автореферат дис. . д-ра с.-г. наук : 06.01.09 / В. А. Іщенко ; Нац. акад. аграр. наук України, Держ. установа "Ін-т зерн. культур". Дніпро, 2021. 44 с.
5. Гамаюнова В.В., Коваленко О.А., Хоненко Л.Г. Сучасні підходи до ведення землеробської галузі на засадах біологізації та ресурсо-збереження : колективна монографія / за редакцією П.В. Писаренка, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава: ПДАА, 2018. 324 с.
6. Дорожко Г.Р. Прямий посів польових культур – один із напрямків біологізованого землеробства. Вісник АПК. 2019. № 2. С.7-11.
7. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. К.: Аграрна освіта, 2010. 617 с.
8. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, 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.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

9. Теорія і розрахунки параметрів процесів і робочих органів сільськогосподарських машин: Практикум. Морозов І.В., Бакум М.В., Пастухов В.І., Горбатовський О.М., Кириченко Р.В., Козій О.Б., Леонов В.П., Нікітін С.П.; за редакцією проф. І.В. Морозова. Харків: ХНТУСГ, 2011.
10. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Мороз С.М., Нестеренко О.В. Попередні дослідження пасивного струнного решета // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2022. Вип. 52. С. 73-80. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.
11. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В., Молокост Л.А. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 50, 2020. – Кропивницький: ЦНТУ. – С. 52-58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
12. 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.
13. Петренко, Д. І., Сало, В. М., & Недельський, Д. С. (2026). Аналіз ефективності роботи каскадного решітного сепаратора зернових сумішей. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, (13(44), 250–260. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).250-260](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).250-260).
14. Патент №139435 Україна, МПК В07В1/00, В07В13/00. Сепаратор гравітаційно-каскадного типу / Дударєв І.М.; Заявлено 20.05.2019; Опубл. 10.01.2020; Бюл. № 1.
15. Пат. 159976 Україна, МПК В07В 1/46, В07В 13/04. Струнне решето / Чучупака О. С., Васильковський О. М., Кришко М. В., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В., Петренко Д. І., Коваленко О. В., Ковальов

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

М. М. ; заявник і власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202500258 ; заявл. 21.01.2025 ; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30.

16. Патент на корисну модель (Україна) № 155792; МПК В07В1/00, В07В13/04. Решето. / Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Довгиш І.О., Нестеренко О.В., Андрієнко О.О. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u2023 03254, заявл. 04.07.2023; опубл. 10.04.2024, бюл. № 15/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1794534/>
17. Патент на корисну модель (Україна) № 156266; МПК В07В1/00, В07В13/07. Решето. / Мороз С.М., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Мороз А.С. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u2023 05852, заявл. 04.12.2023; опубл. 29.05.2024, бюл. № 22/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1801136/>
18. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: Навчальний посібник / За ред. Д.Г. Войтюк, С.С. Яцун, Довжик М.Я. // Суми. Університетська книга. 2008. 450 с.
19. Деталі машин. Розрахунок та конструювання [Текст] : підручник / Г. В. Архангельський, М. С. Воробйов, В. С. Гапонов [та ін.]. Київ : Талком, 2014. 684 с.
20. 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.

					МВПЯ 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		