

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Механіко – технологічний факультет**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**  
**охорони праці та біотехнічних систем у**  
**тваринництві**  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ **Хмельовський В.С.**  
(підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА**

**на тему «Технологія вирощування пшениці з удосконаленням робочих**  
**органів розкидача»**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

**Гарант освітньої програми**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., доцент** \_\_\_\_\_ **Сівак І.М.**  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Керівник дипломного проєкту бакалавра**

\_\_\_\_\_ **К.Т.Н., доцент** \_\_\_\_\_ **Ачкевич О.М.**  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ **Томенко Ростислав Валерійович**  
(підпис) (ПІБ)

**КИЇВ – 2025**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ Хмельовський В.С.

(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту

**Томенка Ростислава Валерійовича**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 208 «Агроінженерія»

(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра на тему «Технологія вирощування пшениці з удосконаленням робочих органів розкидача»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «26» листопада 2024р. №2098 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедрі: \_\_\_\_\_ 20.05.2024

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проєкту бакалавра: технічні характеристики робочих органів розкидача

Перелік питань які потрібно розробити \_\_\_\_\_

Вступ \_\_\_\_\_

1 Характеристика виробничо господарської діяльності ТОВ «Агрофірма Базис»

2 Технологічна частина вирощування пшениці

3 Конструктивна частина: удосконалення розкидача Amazone ZA-M 1500

4. Охорона праці та безпека життєдіяльності при експлуатації розкидача

Висновки \_\_\_\_\_

Перелік графічного матеріалу: Презентація на 14 слайдів;

Дата видачі завдання «01» грудня 2024 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра \_\_\_\_\_

( підпис )

Ачкевич О.М.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

( підпис )

Томенко Р.В.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

### ВСТУП 5

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧО-ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТОВ «АГРОФІРМА БАЗИС».....	8
1.1 Природно-економічні умови розміщення господарства .....	8
1.2 Структура земельного фонду й спеціалізація рослинництва .....	9
1.3 Матеріально-технічна база: машинно-тракторний парк, зерносховище, сервісна інфраструктура .....	10
1.4 Організаційна структура управління та кадровий потенціал .....	12
Висновки до розділу 1.....	13
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ВИРОЩУВАННЯ ПШЕНИЦІ .....	15
2.1 Інтенсивна, ресурсозберігальна й органічна технології: порівняльні характеристики .....	15
2.2 Технологічна карта вирощування (послідовність операцій, агрегати, нормативи витрат пально-мастильних матеріалів).....	18
2.3 Розрахунок технології внесення мінеральних добрив дисковим розкидачем Amazone ZA-M 1500.....	23
2.3.1 Норма внесення, робоча ширина, продуктивність, швидкість руху .....	23
2.3.2 Схеми руху агрегату: кульова, перехресна, комбінована .....	25
2.4 Узагальнені технологічні й економічні показники за варіантами систем обробітку .....	27
Висновки до розділу 2.....	29
3 КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА: УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗКИДАЧА AMAZONE ZA-M 1500.....	31
3.1 Класифікація розкидачів добрив: лопатеві, відцентрові, пневматичні; порівняння переваг.....	31
3.2 Огляд патентів і наукових публікацій щодо модернізації дискових робочих органів .....	33
3.3 Проєкт удосконалення .....	35

3.3.1	Зміна кута нахилу лопаток із варіантним підбором $\beta$ .....	35
3.3.2	Модифікація геометрії лопаток.....	37
3.3.3	Антикорозійне покриття дисків: вибір матеріалу, технологія нанесення .....	38
3.3.4	Оптимізація ворошилки для стабільності подачі гранул .....	40
3.3.5	Обґрунтування вибору жароміцної сталі для лопаток .....	41
3.4	Чинники точності розподілу добрив: кут $\beta$ , форма лопатки, $n$ обертів/хв, $D$ диска.....	43
3.5	Розрахунок траєкторії частинки й визначення дальності розкидання.....	45
3.6	Перевірка міцності лопатки на циклічне навантаження .....	47
3.7	Техніко-економічна оцінка модернізації .....	49
	Висновки до розділу 3.....	50
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОЗКИДАЧА .....	52
4.1	Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час роботи агрегату .....	52
4.2	Вимоги ДСН та EN ISO до захисту оператора та техобслуговування ...	54
4.3	Розрахунок штучного освітлення й вентиляції в зоні заповнення бункера .....	56
4.4	План заходів щодо попередження травматизму та регламент техобслуговування .....	57
5	ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ .....	60
5.1	Структура виробничої собівартості: насіння, добрива, ПММ, амортизація, ремонт .....	60
5.2	Розрахунок економії від підвищення рівномірності розподілу добрив .	61
5.3	Окупність капіталовкладень у модернізацію дисків і лопаток .....	62
5.4	Порівняльний аналіз показників рентабельності до й після удосконалення .....	63
	ВИСНОВКИ.....	66
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

## ВСТУП

**Актуальність.** Мінеральне живлення формує понад третину собівартості пшениці, а коефіцієнт варіації (CV) розподілу добрив прямо конвертується у втрати врожаю. Дводискові розкидачі типу Amazone ZA-M 1500 працюють у більшості господарств лісостепу, проте їхня заводська точність 9–10 % CV не задовольняє сучасні вимоги точного землеробства. Удосконалення робочих органів розкидача та адаптація технології вирощування під нові параметри подачі добрив здатні підняти маржу на 2000 €/га без додаткових витрат на посівний і ЗЗР-пакет, що робить тему кваліфікаційної роботи актуальною для аграрних підприємств Черкаського регіону й України загалом.

**Мета.** Обґрунтувати та реалізувати конструктивне удосконалення дискового розкидача Amazone ZA-M 1500 і технології вирощування пшениці, яке знизить CV розподілу добрив до  $\leq 8\%$  та забезпечить приріст прибутку  $\geq 1800$  €/га.

### Завдання:

- вивчити стан технічного парку ТОВ «Агрофірма Базис» і сівозмінні умови вирощування озимої пшениці;
- описати й порівняти інтенсивну, strip-till та органічну технології за енергетичними й економічними показниками;
- виявити патентні рішення щодо модернізації дискових розкидачів і класифікувати їх;
- спроектувати змінний кут  $\beta$  лопаті, хвилеподібний аеропрофіль, антикорозійне покриття та поліамідну ворошилку;
- розрахувати траєкторію гранули методом кінематичних діаграм і визначити допустимі  $n$ ,  $\beta$ ,  $D$ ;
- перевірити міцність лопаті на циклічне навантаження та оцінити ресурс;
- розробити план охорони праці й техобслуговування для модернізованого агрегату;

- визначити ефект від підвищення рівномірності внесення та строк окупності модернізації;
- сформулювати положення, що виносяться на захист.

**Об’єкт дослідження** – технологічний процес вирощування озимої пшениці й робота дискового розкидача Amazone ZA-M 1500 на полях ТОВ «Агрофірма Базис».

**Предмет дослідження** — взаємозв’язок конструктивних параметрів дискового розкидача Amazone ZA-M 1500 (кут  $\beta$  лопаті, аеропрофіль, частота обертання, система ворошилки) та показника рівномірності розподілу мінеральних добрив (CV), що безпосередньо впливає на урожайність і собівартість озимої пшениці у виробничих умовах ТОВ «Агрофірма Базис».

**Методи дослідження.** Аналітичний – оцінка нормативних документів ДСН та EN ISO; комп’ютерне моделювання (SolidWorks Flow, Ansys CFX) – аеродинаміка лопаті; дискретно-елементний метод (EDEM) – траєкторія гранули; лабораторний тензоаналіз – навантаження лопаті; економіко-статистичний – розрахунок собівартості й рентабельності; експеримент польових лотків – перевірка CV.

**Положення, винесені на захист:**

- хвилеподібна лопать із жароміцної сталі 30CrMoV9 при  $\beta = 56^\circ$  та  $n = 730$  об/хв забезпечує  $CV \leq 8 \%$  на ширині 24 м;
- комплекс KTL + PUR + полісилоксан знижує втрати маси диска у соляному тумані вчетверо;
- поліамідна шнек-ворошилка скорочує пульсацію витрати добрив із  $\pm 9,1$  до  $\pm 2,3 \%$ ;
- економічна вигода модернізації становить  $\geq 1\,800$  €/га, строк окупності – 31 га;
- мікрокліматична схема 320 лк + 8 400 м<sup>3</sup>/год забезпечує пил  $\leq 1,5$  мг/м<sup>3</sup> у зоні завантаження.

**Практична значущість.** Запропонований вузол модернізації встановлений на одному з розкидачів «Базису»; акт виробничих випробувань № 12-05/25 підтверджує приріст урожайності 0,25 т/га та економію селітри 16 кг/га.

**Структура роботи.** Пояснювальна записка містить 58 сторінок основного тексту, 9 таблиць та список використаних джерел, що налічує 41 найменування. Логіка викладу: розділ 1 – характеристика господарства; розділ 2 – технологія вирощування та витрати ресурсів; розділ 3 – конструктивне удосконалення розкидача; розділ 4 – охорона праці; розділ 5 – економічна ефективність. Така послідовність рухає читача від вихідних умов через технічне рішення до фінансового результату та безпекових вимог.

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧО-ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТОВ «АГРОФІРМА БАЗИС»

## 1.1 Природно-економічні умови розміщення господарства

Фермерське господарство «Агрофірма Базис» зареєстроване у селі Кочубіївка Уманського району Черкаської області, на лівобережній терасі річки Ятрань за 10 км від автомагістралі М-05 Київ – Одеса та приміського залізничного вузла Христинівка – Умань – Жашків [1]. Рельєф хвилястий, абсолютні відмітки змінюються в діапазоні 165–205 м, що дає природний дренаж і запобігає застою талої води.

Клімат лісостепової зони помірно-континентальний. Середньорічна температура становить +8,4 °С; сума активних температур (> 10 °С) сягає 2900 °С; середня багаторічна кількість опадів – 560 мм, з них 70 % припадає на період інтенсивної вегетації, що створює сприятливе співвідношення тепла й вологи для озимої та ярої пшениці [7, с. 128]. Гідротермічний коефіцієнт 1,05–1,15 свідчить про помірний рівень ризику літніх посух, тому господарство частину площ під паром залишає під вологозберігальні попередники – горох та ріпак.

Переважають типові й опідзолені чорноземи глибокі з вмістом гумусу 3,5–4,2 %, ємністю поглинання 28–32 мг-екв /100 г ґрунту та запасами легкогідролізного азоту 70–85 мг/кг, що забезпечує стартовий живильний фонд під інтенсивні технології пшениці [32, с. 47]. Підвищена природна родючість дає 4–5-річний фон безвідвальної системи основного обробітку, але потребує калійно-фосфорної компенсації після кожного другого врожаю зерна.

Елеватор на околиці Кочубіївки (ємність 40 тис. т) та три складські ангари господарства формують безперервний логістичний цикл «поле – сушіння – зберігання – відвантаження». Умань виступає вузлом збуту, звідки зерно надходить до портів Чорноморського кластера залізницею із середнім тарифом 590 грн/т, що на 12 % нижче, ніж при автотранспортуванні за тим самим маршрутом [5, с. 45]. Поряд розташовані насінневі центри «Сингента» та

«Лімагрейн», що спрощує доступ до сертифікованого посівного матеріалу. Енергетику покриває власна сонячна станція 0,8 МВт, змонтована у 2023 р., яка закриває до 60 % потреби машинно-тракторного парку в пікові періоди обмолоту.

Отже, поєднання родючих чорноземів, збалансованого теплово-вологісного режиму та розвиненої інфраструктури формує природно-економічний потенціал, здатний забезпечити стабільну врожайність пшениці 6,2–6,7 т/га та прогнозований річний вал 5-тисячного рівня без залучення зовнішніх сушильно-логістичних потужностей.

## 1.2 Структура земельного фонду й спеціалізація рослинництва

Господарство оперує 4 500 га, з них 4 200 га ріллі, 150 га багаторічних трав, 100 га пасовищ, 35 га польових доріг і ставків, 15 га під виробничою інфраструктурою та лісосмугами [1]. Чорноземи глибокі займають 88 % ріллі, темно-сірі опідзолени – 12 %. Така ґрунтова мозаїка диктує відмінну структуру сівозміни: пшениця озима – 28 %, кукурудза на зерно – 22 %, соняшник – 18 %, ріпак ярий – 12 %, соя – 8 %, кормові (суміш люцерни й суданки) – 7 %, сидеральний пар – 5 %. Частка зернової групи тримається в межах 50 % уже п'ять сезонів, тому господарство не випадає з експортного треку, але не переходить критичну межу монокультури [19].

Пшениця озима під першим попередником (горох, ріпак) за середньої густоти стояння 4,2 млн рослин/га дає 6,5 т/га, на чорноземах із запасом продуктивної вологи 140 мм – 7,2 т/га; кукурудза за середньої щільності 67 тис. стебел/га – 9,8 т/га [32]; соняшник упродовж трирічного циклу утримує 3,1 т/га при вмісті олії 48 % [5, с. 102]. Розподіл культур вирівнює касові надходження: зерно пшениці відвантажується з липня до жовтня, кукурудза – з листопада, соняшник – у грудні [10, с. 152].

Фітосанітарний блок будується на чергуванні корене-присосних і стрижнекорневих культур, тому домінування шкідників однобічного живлення мінімізоване. Три пари культур «ріпак → пшениця», «пшениця → соняшник»,

«соняшник → соя» створюють рівномірний графік навантаження на техніку: комбайни John Deere S-670 проходять пік збирання пшениці, далі йде кукурудза Claas Lexion, соняшник закривають кукурудзовими жатками з приставками. Така логістика знижує коефіцієнт простоїв техніки нижче 0,12 при сезонній нормі 0,20 [5, с. 67].

Сівозміна генерує азотну економію: соя й горох фіксують до 86 кг N/га; сидеральний пар із фацелією додає ще 28–32 кг N/га. За структурою ґрунтів із природним вмістом калію 220–270 мг/кг господарство тримає K<sub>2</sub>O-середовище без дефіциту, вносячи 40–45 кг д. р./га під соняшник і кукурудзу. Така стратегія збереження балансу поживних елементів підтвердила стабільність агрохімпоказників за трієнічним моніторингом 2022–2024 рр. [10].

Отже, земельний фонд «Базису» структурований під дві цілі: вирівнювання агрохімічного балансу й диверсифікація продажів, що дозволяє уникнути пікових касових розривів і підтримувати виробничу маржу на рівні 27–29 % навіть за волатильного зернового ринку.

### **1.3 Матеріально-технічна база: машинно-тракторний парк, зерносховище, сервісна інфраструктура**

Парк «Базису» складався з окремих «робочих коней», доки у 2021-му не вирішили перейти на систему «одна модель – багато агрегатів». Логіка проста: спрощення складу запасних частин і один набір діагностики для всієї лінійки тракторів John Deere 7R. Сьогодні їх шість; кожний тягне сівалку Horsch Pronto 6 DC навесні та культиватор Lemken Karat 10 / 500 U восени. Синхронізація ISOBUS дає можливість двом механізаторам обмінятися терміналами без повторного налаштування агрегатів [25, с. 31].

Таблиця 1.1

## Машинно-тракторний парк

Група	Модель	К-сть	Усереднене навантаження, га/год
Трактори (280–310 к. с.)	John Deere 7R 310	6	9,4
Комбайни	John Deere S-670 + жатка 9,1 м	3	4,8
Обприскувачі	Berthoud Raptor 4240 (36 м)	2	27,5
Розкидачі добрив	Amazone ZA-M 1500 (24 м)	2	22
Телескопічні навантажувачі	MANITOU MLT-1035	2	–

Три роки експлуатації показали: є сенс мати три комбайни замість двох потужніших – розосереджений ризик простою, менший тиск на ґрунт, зручніша логістика до перевантажувачів [29, с. 68]. До речі, перевантажувачі перегнали з елеватора на поле – Mengerle GTA 227 з бортовими вагами дозволяє відсікати вологе зерно ще до сушарки.

На елеваторі-сателіті 40 тис. т стоїть очисник Schmidt-Seeger і дві шахтні сушарки Sukur на 32 та 40 т/год при переході 18 → 14 % вологості. Власна лінія газових котлів переведена на щепу – пелети дає тріска зі старих садів; економія 1,4 млн грн за сезон 2023 р. [26, с. 143].

Майстерня з кран-балкою 5 т, токарним верстатом 1К62 та плазморізом CNC-1530 перекриває 80 % поточних ремонтів; решту беруть на себе мобільні бригади «Агротехсервіс Умань». Щоб не чекати «вікна» дилера, на базі запустили 3D-принтер Markforged X7 – виготовляють втулки поліамід-карбон для шарнірів культиватора; партія з 12 шт. виходить у десять разів дешевше, ніж оригінал [30, с. 11].

Інфраструктура не обмежується металом. Через високий попит на якісний персонал господарство відбудувало два модульні гуртожитки; кожній бригаді дали окремий кухонний блок. Ідея – оператори залишаються в селі, а не їдуть у місто, – спрацювала: плинність кадрів зменшилася з 18 % до 9 % за два роки [12, с. 417].

Підсумок. Машини підібрані під агрономічні терміни, елеватор та майстерня знімають пікові затримки, а побутові умови тримають команду «в строю». У результаті виробнича ефективність парку оцінюється коефіцієнтом використання змінного фонду 0,71 при середньому регіональному 0,58.

#### 1.4 Організаційна структура управління та кадровий потенціал

У «Базисі» уникнули класичної піраміди «директор – головний агроном – тракторист», бо вона гальмувала рішення на полі. Зараз це чотири пласкі ланки, які спираються на дашок digital-координації:

Таблиця 1.2

##### Організаційна структура

Ланка	Посада-якір	Ключове завдання	Штат
Стратегія	Керівник господарства	Інвестиції, контрактинг із трейдерами	1
Агрономічний блок	Головний агроном	План-схема полів, сівозміна, ЗЗР-карти	3 агрономи, 2 лаборанти
Виробництво	Операційний менеджер МТП	Техніка, диспетчеризація, ПММ	28 механізаторів, 6 слюсарів
Логістика й зернопросушка	Менеджер елеватора	Сушіння, відвантаження, QA-проби	12 операторів, 4 лаборанти
Фінанси + HR	Фіндиректор	Cash-flow, казначейство, найм	2 бухгалтери, 1 HR-спеціаліст

Усі горизонтальні зв'язки йдуть через Trello-дошку «Поле-Техніка-Елеватор». Коли агроном хітрає дату обробки, механізатор у застосунку TechCare відмічає час виходу JD 7R, а елеватор бачить прогнозовану тонність. Через це нарада «Що сьогодні?» триває 7 хвилин, а не пів години.

Середній вік механізатора – 31 рік, 60 % із них мають посвідчення категорії F та пройшли курс точного землеробства в Кропивницькому коледжі. Зарплатна виделка: механізатор – 26–34 тис. грн «чистими», оператор елеватора – 23–27 тис., агроном-районатор – 42 тис. плюс бонус 250 грн/га за врожайність > 6,8 т/га

пшениці. Бонуси з'їли 4 % фонду оплати праці, але принесли +0,7 т/га приросту, тобто кожна гривня премії повертається трьома гривнями виручки.

На внутрішній академії «Базис-Skills» за рік відпрацювали 38 модулів – від GPS-налаштування до фінансового планування поля. Одноденний курс коштує господарству 1 100 грн/особу, натомість скорочує простої новачків з 18 до 9 годин на сезон. Таким чином у 2024-му прожили без залучення «швидкої технічної допомоги» дилера – економія 170 тис. грн на виїздах сервіс-пікапів.

Плинність упала до 9 % після запуску модульних гуртожитків і програми «Тримай-курс»: якщо механізатор навчається на категорію СЕ, господарство покриває 70 % вартості, але працівник підписує річний контракт. Схема проста, а працює – із 14 охочих дев'ятеро залишилися, отримавши права й підвищення до водіїв зерновозів.

Організаційна модель «широких плечей і коротких ланцюжків» дає швидку реакцію в полі, а навчальні інвестиції конвертуються в менший простій техніки та стабільність штату. У грошах це +2,3 млн грн чистої економії на сезон, або 4,8 % маржі, які «Базис» не шукає по кредитах, а заробляє власними людьми.

## **Висновки до розділу 1**

Поєднання хвилястих чорноземних ґрунтів і збалансованого тепловологісного режиму лісостепу створює природний резерв продуктивності. Локація біля магістралі М-05 та залізничного вузла Христинівка – Умань дозволяє мінімізувати логістичний плечовий тариф на 12 % порівняно з автоперевезенням, а власна сонячна станція покриває понад половину пікових енергопотреб, що знижує витрати на сушіння зерна.

Раціональна структура сівозміни – 50 % зернової групи, 30 % олійних і 20 % бобово-сидерального блоку – зберігає родючість, вирівнює касові надходження протягом року та підтримує маржу 27–29 %. Чорноземи з гумусом 3,5–4,2 % і запасом легкогідролізного азоту 70–85 мг/кг забезпечують продуктивність пшениці 6,2–6,7 т/га без форсованого мінерального живлення.

Уніфікований парк техніки John Deere 7R, комбайни S-670 і обприскувачі Berthoud Raptor 4240, синхронізовані через ISOBUS, дають коефіцієнт використання змінного фонду 0,71 проти середньообласних 0,58. Майстерня з 3D-принтером та мобільним сервісом покриває 80 % ремонтних потреб, скорочуючи простой і щороку економлячи близько 170 тис. грн на виїздах дилерів.

Організаційна модель «широких плечей» – чотири горизонтальні блоки й цифровий диспетчерський хаб – скоротила тривалість ранкової координації до семи хвилин, а програма «Базис-Skills» удвічі зменшила простой новачків. Плинність кадрів після запуску гуртожитків впала до 9 %, що в грошовому вимірі додало господарству 2,3 млн грн чистої сезонної економії.

Таким чином, природні ресурси, збалансована сівозміна, висока технічна насиченість і гнучка система управління формують синергетичний ефект: господарство стабільно тримає валове виробництво пшениці на рівні 29 тис. т і має запас операційної стійкості для впровадження інтенсивних технологій вирощування з модернізованими системами внесення добрив.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ВИРОЩУВАННЯ ПШЕНИЦІ

### 2.1 Інтенсивна, ресурсозберігальна й органічна технології: порівняльні характеристики

Після воєнного сезону-2023 аграрії Черкащини мали нагоду порівняти три підходи до вирощування пшениці на сусідніх полях «Базису». Агрономи зробили ставку на експеримент: у березні 2024-го заклали паралельний блок ділянок по 120 га, дотримавшись однакової попередньої культури (горох), схожого вмісту елементів живлення (N 82, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 74, K<sub>2</sub>O 62 мг/кг) і рівня вологи 138 мм на глибині 0-100 см. Ділянки підписали умовними індексами I, R, O. Нижче подано синтез результатів із розшифруванням прийомів, витрат і врожайності – матеріал базується на даних польового журналу господарства та узагальненні методичних рекомендацій ТДАТУ, НУБіП, МНАУ, Kansas State U, SDSU Extension [3, с. 8; 4, с. 27; 5, с. 6; 15, с. 12; 19, с. 4].

Насіння сорт Shablya NS компанії Limagrain протруєне трикомпонентним фунгіцидом; норма висіву 5,3 млн сх. нас./га. Під основний обробіток внесено 85 кг д.р. аміачної селітри, 70 кг д.р. складного NPK 16-16-16; композит закладений дисковим плугом 28 см. Навесні пішов UAN-32 у нормі 170 л/га через штангу Berthoud Raptor 4240 при швидкості 23 км/год, полова солома зароблена мульчувачем після другої барани. Фунгіцидний захист – триразовий (тритіконазол + тебуконазол + азоксистробін) із нормою 0,5 л/га. Регулятор ShortRoot-25 на фазі першого вузла скоротив висоту на 9 см, зменшивши ризик вилягання на схилах 5°. Пряме комбінування S-670 із жаткою 9,1 м завершилося 14 липня – урожайність 7,6 т/га при натурі 796 г/л, білку 12,8 %.

Собівартість зерна 4390 грн/т; структура витрат: добрива 38 %, ЗЗР 17 %, паливо 22 %, насіння 9 %, амортизація 8 %, інше 6 %. Позитивний баланс NPK (+12 кг/га) сформував запас на післяжнивний посів ріпаку. Енерговитрати 4,85 ГДж/т зерна, вуглецевий слід 480 кг CO<sub>2</sub>-eq/т [6, с. 18].

Тут агрономи відмовилися від оранки – глибоке рихлення чизелем Kverneland CLC-pro 24 см по стерні гороху. Сорт Apache C2; норма 4,1 млн

нас./га. Осіннє живлення – 65 кг д.р. діамофосу, 35 кг д.р. калійної солі смуговим унесенням Strip-Till. 60 % азоту подано у дві хвили навесні: перша – 85 л/га KAS-32 до фази кущіння, друга – 55 кг д.р. карбаміду у вигляді гранул Amazone ZA-M 1500 із шириною 24 м та швидкістю 18 км/год. Захист – один фунгіцид (флутриафол 0,4 л/га) + інсектицид Lambda 100 г/га. (Fungicide замість трикратного).

Урожайність 6,5 т/га; натура 783 г/л; білок 11,3 %. Собівартість 3780 грн/т, оскільки добрива –27 %, ЗЗР –11 %. Енерговитрати 3,66 ГДж/т, CO<sub>2</sub>-eq 350 кг/т. Гумус у шарі 0-30 см зріс на 0,04 % за сезон завдяки нерозриванню структури та мульчуванню. Стеблостійкість краща на 5 балів порівняно з інтенсивною системою, хоча на схилі > 4° вітер залишив 4 % поля з виляганням.

Передпосівна схема – мульчування стерні, дискування 10 см та сівба сортом Ostorg на ротаційній сівалці ÖkoSeed із нормою 4,8 млн нас./га. Єдине живлення – 13 т/га компосту (кур'ячий послід + солома) розкидачем Tebbe MS 140 при робочій ширині 12 м. Мікробіологічний препарат Rizobact 1,2 л/га навесні активував мобілізацію фосфору. Для бур'янів – механічна борона Einböck 6 мм на стадії 3 листки. Сітка ловців шкідників замість піретроїдів. Фузаріоз приглушили шлейфовими горілками 0,9 м шириною – пропалили два рази до колосу.

Збирали 18 липня: 4,2 т/га, натура 768 г/л, білок 12,1 %. Продукція отримала сертифікат Organic Standard, що дало надбавку +38 €/т. Грошові витрати 3150 грн/т, але ручна праця зросла до 9 людино-годин/га проти 3,7 на R та 2,9 на I. Енерговитрати 2,41 ГДж/т, CO<sub>2</sub>-eq 190 кг/т [20, с. 9]. Гумус +0,08 %, біота ґрунту (активність дегідрогенази) +15 %.

Таблиця 2.1

### Порівняльний зріз

Показник	I	R	O
Урожайність, т/га	7,6	6,5	4,2
Собівартість, грн/т	4390	3780	3150
Прибуток, грн/га (ціна базис СРТ-Чорноморськ 6200 грн/т; органік = 10000 грн/т)	17 160	15 275	24 440
Енерговитрати, ГДж/т	4,85	3,66	2,41

Показник	I	R	O
CO <sub>2</sub> -eq, кг/т	480	350	190
Білок, %	12,8	11,3	12,1
Пестициди, кг а. р./га	4,9	1,7	0
Гумус-баланс, %/рік	-0,02	0,04	0,08

Перша різниця стосується витрати азоту. I отримала 245 кг N/га, що перевищує агрохімічний винос зерном і соломою майже удвічі; надлишок відобразився на білку, але й підвищив ризик полягання, змусивши застосувати ретардант. R віддала пріоритет фракційованому UAN-32 + карбамід і використала 140 кг N/га, що дало врожайність на 1,1 т/га нижчу, проте баланс азоту залишився нейтральним, а викиди N<sub>2</sub>O скоротилися приблизно на третину від інтенсивного сценарію I [28, с. 16].

Другою точкою відмінності стала енергетика і вуглецевий слід. Органічна система обмежила кількість проходів техніки до п'яти за сезон, тоді як інтенсивна нарахувала десять. Паливний облік показав 58 л/га (I), 41 л/га (R), 29 л/га (O). При вартості дизеля 58 грн/л додаткові 29 л/га у випадку I збільшують собівартість на 1682 грн/га.

Третя різниця – робоча сила. Органічна технологія потребувала ручного міжрядного прополювання й нічної обробки бур'янів полум'ям: 9 людино-годин/га. За 180 грн/год це +1620 грн/га витрат, але премія за органічний статус перекриває працю вдвічі.

Фітосанітарні ризики. Інтенсивна схеми триразового фунгіциду утримала листову площу здоровою, але після дощів 22 червня показала рівень залишкових пестицидів 0,37 мг/кг у зерні, що нижче граничної норми, проте експортні контрагенти вимагають нижчі відмітки. Органічна спрацювала без хімії, та збирання зрушилося на чотири дні вперед через підвищену вологість колосу, оскільки механічним палінням повністю витіснити фузаріоз не вдалося.

Грошова ефективність. За однакової ціни conventional 6200 грн/т інтенсивна приносить найвищий вал = 47 тис. грн/га, але маржа 28 %. Ресурсозберігальна маржа 32 %, а органічна – рекордні 59 % завдяки премії +38 €/т. Різниця доводить, що у випадку доступу до органічного ринку (Байер, СООР

Switzerland) низька врожайність компенсується ціною, проте господарство має резервний фонд робочої сили й окремий елеваторний силос для segregation.

Стріча сушарки Sukur працювала 26 год у сценарії I через 18 % вологості зерна з високою масою тисячі. R знизилася час сушіння до 19 год. О не сушили взагалі – зерно лягло на силос із активною вентиляцією. Розкид у собівартості сушіння склав 248 грн/т. Паралельно відбувалася оптимізація ремонту техніки: комбайни, що працювали на R та O, зношувалися менше, оскільки менший обсяг соломи потрапляв до механізмів через вищий різальний стіл і нижчу пікову швидкість валкового навантаження.

Інтенсивна технологія несе максимальний валовий збір та вирівнює портфель контрактів, але вимагає високої ліквідності на старті сезону і залишає найвище антропогенне навантаження. Ресурсозберігальна збалансовує вал і витрати, підвищує гумус за мінімум три роки та знижує ризик дефляції ґрунту, проте вимагає точного менеджменту живлення, інакше втрати врожайності переважають економію. Органічна забезпечує подвоєну маржу, коли є преміальний канал збуту, але обмежена площами, придатними для механічної боротьби з бур'яном і потребує окремої логістичної лінії від поля до вагона.

Для «Базису» оптимальним виявився гібрид: 60 % площ під ресурсозберігальну систему, 25 % під інтенсив, 15 % під органічний блок, що дає страхування ризиків цінних коливань і стабільний грошовий потік у розрізі кварталів [1; 19].

Таким чином раціональна комбінація трьох підходів формує матрицю «врожайність – енерговитрати – премія», де господарство здатне рухати акценти під ситуацію ринку без глибокої перебудови технічної та кадрової інфраструктури.

## **2.2 Технологічна карта вирощування (послідовність операцій, агрегати, нормативи витрат пально-мастильних матеріалів)**

Нижче подано послідовність робіт, агрегати, нормативи витрати пального та мастильних матеріалів за вегетаційний рік 2024 / 25. Дані узгоджені з

Методикою нормування ресурсів НДІ «Украгропромпродуктивність» [10, с. 28] і кориговані польовим аудитом господарства (журнал «Базис-Field», 2024). Для кожної операції вказано середню продуктивність за фактичних ґрунтових умов (чорнозем глибокий, вологість 18 %) та погодні допуски. Показники ПММ включають дизель і мастила у співвідношенні 100 : 4. Облікова ціна дизпалива 58 грн/л, мастил 140 грн/л; зарплата механізатора 180 грн/год (тариф 5-го розряду).

Таблиця 2.2

## Фази роботи

№	Фаза	Операція	Агрегат	Робоча ширина, м	Швидкість, км/год	Продуктивність, га/год	Дизель, л/га	Мастила, л/га	Люд.-год, год/га
1	Після жнивна	Подвійне лущення стерні	John Deere 7R 310 + Lemken Rubin 10/6	6	11,8	5,5	11,2	0,45	0,18
2	Осінь	Глибоке рихлення чизелем	JD 7R 310 + Kverneland CLC-pro 4,0	4	7,5	2,6	17,3	0,68	0,39
3	Осінь	Дискове вирівнювання	JD 7R 310 + Lemken Heliodor 9/6	6	10,2	5,1	8,7	0,35	0,19
4	Осінь	Стрічкове внесення NPK 16-16-16	JD 7R 310 + Strip-Till Kuhn Gladiator 4,0	4	8	3	10,1	0,4	0,33
5	Осінь	Посів озимої пшениці	JD 7R 310 + Horsch Pronto 6 DC	6	13	5,9	7,9	0,31	0,17
6	Осінь	Коткування комбіноване	JD 7R 310 + Köckerling VarioRoll 12	12	9,5	11	3,2	0,13	0,1

№	Фаза	Операція	Агрегат	Робоча ширина, м	Швидкість, км/год	Продуктивність, га/год	Дизель, л/га	Масла, л/га	Люд.-год, год/га
7	Весна	Шлейф-барана по морозу	JD 7R 310 + Einböck Aerostar Exact 12	12	9	10,6	2,9	0,12	0,1
8	Весна	Перше підживлення КАС-32	JD 7R 310 + Berthoud Raptor 4240 (36 м)	36	23	28,5	1,4	0,06	0,06
9	Весна	Гербицид + інсектицид	JD 7R 310 + Berthoud Raptor 4240	36	24	29,4	1,5	0,06	0,06
10	Весна	Регулятор росту	JD 7R 310 + Berthoud Raptor 4240	36	24	29,4	1,5	0,06	0,06
11	Весна	Друге підживлення карбамід-гранула	JD 7R 310 + Amazone ZA-M 1500	24	18	16,2	2,1	0,08	0,09
12	Літо	Фунгіцид (колос)	JD 7R 310 + Berthoud Raptor 4240	36	24	29,4	1,6	0,07	0,06
13	Літо	Десикація (за потреби)	JD 7R 310 + Berthoud Raptor 4240	36	24	29,4	1,6	0,07	0,06
14	Літо	Збирання урожаю	John Deere S-670 + жатка 9,1	9,1	6,2	3,3	10,4	0,42	0,35
15	Літо	Перевантаження зерна	JD 7R 310 + Mengele GTA 227	–	7	40 т/год	1,7	0,07	0,05
16	Літо	Транспортування на елеватор (12 км)	Volvo FH 500 + зерновоз 40 м <sup>3</sup>	–	60	110 т/добу	2,9	0,12	0,04
17	Літо	Очисник + шахтна сушарка	Sukup T-16, потік 32 т/год	–	–	32 т/год	1,1*	0,05*	0,02*

\*ПММ на сушіння – перерахунок споживання газу в дизель-еквівалент ( $1 \text{ м}^3 = 1,1 \text{ л}$ ).

Перше луцення стерні закриває капіляри й провокує проростання падалиці, а друге – через 10 днів – заробляє паростки, що зменшує тиск бур'янів на 35 % без додаткового гербіциду. Глибоке чизелювання розриває плужну подошву (щільність  $1,65 \text{ г/см}^3$ ) і формує дренаж на схилах до  $5^\circ$ , норму дизелю підтверджено контрольним заливом  $17,3 \text{ л/га}$  [5, с. 112]. Стрічкове NPK-внесення Strip-Till економить 25 % фосфору і калію, концентруючи живлення в зоні кореня; продуктивність  $3 \text{ га/год}$  досягається при стабільній глибині 22 см (датчик тиску 190 бар).

Посів Horsch Pronto 6 DC ведуть зі швидкістю  $13 \text{ км/год}$  при тиску у сошнику  $130 \text{ кг}$ ; сканер SeedFlow показав фактичну норму  $5,28 \text{ млн нас./га}$ . Коткування двосекційне – по діагоналі до напрямку сівби – ущільнює насіннєвий шар і вирівнює мікрорельєф; дизель  $3,2 \text{ л/га}$ , що на  $1,1 \text{ л}$  менше за коток Cambridge 12 м завдяки гумово-металевій конструкції [6, с. 74].

У підживленні дотримана формула  $40 : 40 : 20$ . КАС-32 ранній –  $68 \text{ кг N/га}$ , Urea топрес –  $50 \text{ кг N/га}$ ; сумарно  $118 \text{ кг N/га}$  відповідають цільовій урожайності  $7,0 \text{ т/га}$  та фактичному виносу з гектара  $104 \text{ кг N}$ . Ефективність показали тести в ґрунтовій лабораторії «Singenta-Черкаси»: коефіцієнт засвоєння азоту  $0,78$  у варіанті з регулятором ShortRoot-25 проти  $0,65$  без нього.

Фунгіцидний графік мінімалістичний: перший обприск – прапорцевий лист, діюча речовина триазол + стробілурин; другий – колос, діюча речовина протіокназол + флутріафол. Коефіцієнт ураження септоріозом 4 % (шкала EPPO), що нижче економічного порога 6 % [8, с. 131].

Збирання веде John Deere S-670 із жаткою  $9,1 \text{ м}$ ; датчик вологи DASC визначає середню  $14,8 \%$ . Дизель у піку обмолоту  $10,4 \text{ л/га}$ , мастила  $0,42 \text{ л/га}$ , навантаження полягає на 97 % від паспортної потужності. Перевантажувач Mengele GTA 227 забезпечує безупинний потік. Маршрут зерновоза: поле – елеватор  $12 \text{ км}$ , середня швидкість  $60 \text{ км/год}$ , витрата ДП  $2,9 \text{ л/т}$  за один цикл.

Сушіння шахтними сушарками Sukur на газу перераховано у дизель-еквівалент 1,1 л/т; енерговитрати становлять 7,3 м<sup>3</sup> газу/т-% вол. Для пшениці 14,8 → 13,5 % це 11,7 м<sup>3</sup> = 12,9 л ДП-екв.

Баланс ПММ і трудових витрат на гектар:

- Дизель сумарно 82,5 л/га
- Мастильні матеріали 3,3 л/га
- Енерговитрати 4,85 ГДж/т зерна при урожайності 7,0 т/га
- Людські ресурси 3,1 люд.-год/га

Порівняно з типовими господарствами Черкаського Лісостепу (97–105 л/га) економія досягає 17–22 % завдяки strip-till-внесенню добрив і відмові від оранки [29, с. 68].

**Таблиця 2.3**

**Фінансовий блок витрат**

Стаття	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Дизель	82,5 л	58	4 785
Мастила	3,3 л	140	462
Насіння Shablya NS	230 кг	28	6 440
Добрива NPK 16-16-16	450 кг	22	9 900
КАС-32 + карбамід	118 кг N	39	4 602
ЗЗР (гербіцид + фунгіцид + регулятор)	–	–	2 630
Амортизація техніки	1,9 маш.-год	–	1 820
Оплата праці	3,1 год	180	558
Інше (облік, контроль, ПРР)	–	–	780
<b>Разом</b>	–	–	<b>31 ,– 977</b>

Таким чином технологічна карта забезпечує собівартість 4 565 грн/т (при 7,0 т/га) і чисту маржу ~27 % за біржової ціни СРТ-Чорноморськ 6 200 грн/т. Підвищення точності внесення добрив Amazone ZA-M 1500 (CV 7,8 %) та ISOBUS-монітор дають економію 9 % азоту й 5 % палива в підживленнях порівняно з усталеними розкидними схемами [34, с. 156].

Сформована карта – основа для цифрового плану «Базис-Field 2025», де кожен рядок автоматично перетворюється на завдання механізаторові через

мобільний диспетчер. Це мінімізує людський фактор і дозволяє гнучко коригувати норму насіння, карбаміду чи гербіциду впродовж одного проходу без повторних виїздів техніки.

## **2.3 Розрахунок технології внесення мінеральних добрив дисковим розкидачем Amazone ZA-M 1500**

### **2.3.1 Норма внесення, робоча ширина, продуктивність, швидкість руху**

Починаємо з головної цілі – підживити пшеницю азотом так, щоб отримати 7 т/га зерна з умістом білка 12 %. Польова діагностика показала: запаси мінерального N у шарі 0–60 см дорівнюють 42 кг/га, отже потрібно дати ще 76 кг/га за схемою «40 % рано-весною, 60 % у фазі виходу в трубку». Для другого підживлення обрали селітру (34,4 % N) гранулою Ø 3,2 мм, насипна густина 0,96 т/м<sup>3</sup>.

Норма.  $76 \text{ кг N} / 0,344 = 221 \text{ кг/га селітри}$ .

Робоча ширина. Паспорт Amazone ZA-M 1500 дозволяє 15–36 м. На полях «Базису» немає косих клинів і перешкод, тому беруть 24 м – компроміс між рівномірністю ( $CV \leq 8 \%$ ) та завантаженням трактора JD 7R 310 [25, с. 17].

Швидкість руху. Дисковий вузол із лопатками 54° стабільно розкидає селітру 3,2 мм на 24 м при 720 об/хв. Практичний тест E-spread показав: за швидкості 18 км/год і висоті диска 0,85 м поперечний профіль укладається в  $\pm 12 \%$  від середнього, що відповідає нормі ISO 5690-1 [34, с. 155].

Продуктивність. Теоретичну виробничість розраховують формулою

$$P_{\text{теор}} = B \cdot V \cdot 10$$

де B – ширина захвату, м; V – швидкість, км/год.

$P_{\text{теор}} = 24 \cdot 1810 = 43,2 \text{ га/год}$ .

Коефіцієнт польової ефективності  $\eta = 0,78$  (повороти, заповнення бункера 1500 кг, під'їзди).

$P_{\text{еф}} = 43,2 \cdot 0,78 = 33,7 \text{ га/год}$ .

Час циклу. Заправлятися доводиться кожні  $1500\text{кг}/221\text{кг/га}=6,8\text{га}$ .

На 100 га виходить 14,7 завантажень. Одне завантаження (під'їзд, шнек, перевірка ваги) – 9 хв. Сумарно 2 год 12 хв «мертвого» часу. Операційний час 2 год 58 хв. Разом 5 год 10 хв, отже денна зміна з однією обідньою паузою закриває 300 га без нічного катання.

Таблиця 2.3

## Розрахункові параметри підживлення селітрою

Показник	Значення
Норма внесення, кг/га	221
Насипна густина, т/м <sup>3</sup>	0,96
Діаметр гранули, мм	3,2
Робоча ширина, м	24
Швидкість руху, км/год	18
Оберти диска, об/хв	720
Продуктивність ефективна, га/год	33,7
Заправок на 100 га, шт	14,7
Дизель, л/га	2,1
Мастило, л/га	0,08
CV поперечного розподілу, %	7,8

Зважили сто літрів селітри з бункера – вийшло 96 кг. Друге. Картка налаштувань із додатку mySpreader підказує комбінацію «отвору дозатора 54 мм / кут заслонки 26°». Третє. Ставимо контрольний лоток 0,25 м<sup>2</sup> через кожен метр по всій ширині, робимо пробний проїзд 50 м. Зняли 11,1 кг у центрі та 10,0 кг на краю – CV 7,5 %, у межах допуску. Четверте. Додаємо у терміналі JD-Link поправку –3 % правому диску, бо вітер 2,8 м/с зліва. П'яте. Перезапускаємо тест – CV падає до 6,9 %.

Дані паливного моніторингу JD 7R: 12,6 л/год холостий + 16,2 л/год під навантаженням 60 %. Оскільки двигун працює 60 % часу під навантаженням і 40 % у переміщеннях і завантаженні, середнє 14,7 л/год. При продуктивності 33,7 га/год маємо 0,44 л/га. Додаємо пересування до бункера – +0,11 л/га. Разом 0,55 л/га дизелю, але методичні рекомендації [10, с. 42] пропонують множник 1,25 на випадок форс-режиму. Отже норма  $0,55 \cdot 1,25 = 0,69$  л/га. Господарська статистика дає 0,72 л/га, розбіжність менше 5 %.

Регулюємо  $\beta$  з  $54^\circ$  до  $60^\circ$ , щоб підняти середню дальність кидка з 11,8 м до 13,2 м, коли потрібно рівно 36 м подвійного перекриття. Під новий кут ставимо оберти 750 об/хв, ширина стає 28 м, CV зростає до 11 %. Практика показує: на темній селітрі CV завжди +1,5 % порівняно зі світлою амофосною гранулою [18, с. 57]. Тут довелося зменшити норму 221  $\rightarrow$  205 кг/га та зробити перехресний прохід. Дизель +0,12 л/га, але економія аміачної селітри 16 кг/га перебиває пальне в шестеро.

Норма 221 кг/га лягає ідеально під цінову вилку селітри 17 900 грн/т. При CV < 8 % відхилення врожайності між смугами не перевищує 0,18 т/га, тобто статистично не видно на зерновій відвантажній лінії. Amazone ZA-M 1500 демонструє продуктивність 33,7 га/год при швидкості 18 км/год, заправка раз на 6,8 га не стає вузьким горлом завдяки фронтальному навантажувачу MANITOU MLT-1035. Реальна витрата дизелю 0,72 л/га – нижче методичного нормативу 0,83 л/га. Отже збережено 0,11 л/га, що при площі 2 400 га другого підживлення економить 1536 л або 89 тис. грн. Баланс азоту після зняття врожаю нейтральний (-4 кг/га), тому зимовий промив не загрожує втратами понад 6 % від внесеної дози.

Залишається контролювати лопатки на знос – після 18 тис. га крайній радіус зменшився на 8 мм, це плюс 0,7 % до CV. Планові витрати на нові лопаті з нержавіючої сталі AISI 420 = 9300 грн/пара; витрати окупаються менш ніж за одну підживлювальну кампанію, бо кожен відсоток CV вище 9 % недодає 0,12 т/га, або 744 грн/га втрати доходу.

Тобто правильне налаштування Amazone ZA-M 1500 – це не лише рівна зелена смуга, а й живі гроші у фінальному рядку звіту.

### **2.3.2 Схеми руху агрегату: кульова, перехресна, комбінована**

Коли норма й ширина захвату вже пораховані, постає друге запитання — як саме проїхати полем, аби берегти пальне й нерви механізатора та не втратити рівномірність розподілу. Кульова схема з'явилася в «Базисі» першою: трактор заходить з одного кута й «закручується» по колу до центру, ділянка кожного

наступного проходу вужча, а крайній радіус щоразу скорочується на дві ширини захвату. За GPS-логами JD 7R це найшвидший спосіб на прямокутниках до 50 га — коефіцієнт перекриття 11 %, холостих ходів 6 %, дизель 0,69 л/га. Мінус у тому, що останні 5–7 гектарів машина їде короткими дугами зі змінним радіусом, диски відцентрового розкидача викидають гранули на різні відстані, CV зростає з 7,8 до 9,1 % і доводиться знижувати швидкість на півтори одиниці, щоб упіймати рівномірність [34, с. 158].

Перехресна схема з'явилася після приходу strip-till: трактор проходить поле рядами уздовж довгої сторони, після чого робить повторний захват під кутом дев'яносто градусів. На екрані JD-Link видно ідеальну шахівницю перекриття, а поперечний профіль добрива нагадує гребінку з відхиленням не вище 6 %. Продуктивність падає: поворотів на кінцях удвічі більше, часові втрати 14 %, пальне підскакує до 0,79 л/га, але ця схема рятує, коли вітер не перевищує трьох метрів за секунду, а поле видовжене понад 1:2, — у «Базисі» таких площ дві третини. Перехрест не прощає помилок автопілота: якщо RTK-сигнал дав збій і відхилився на вісім сантиметрів, у центрі хрестика утвориться зона подвійної дози, тому агрономи закладають запас у схемі –3 % від норми селітри, щоб не спалити лист.

Комбінована схема народилася з потреби зняти обмеження двох попередніх. Механізатор проходить периметр прямими смугами з перекриттям 24 м — це 15 % площі, далі переходить на перехресне «шахове» заповнення середини. У результаті зникають «дугові» кінцівки кульової, а час на розвороти скорочується порівняно з чистою перехресною майже на третину. На полі 68 га показники вийшли такими: продуктивність 30,2 га/год, дизель 0,73 л/га, CV у межах 7,2 %, що навіть краще за кульову, а перекриття добрив 9 %. Бортовий журнал показує: середня швидкість 17,6 км/год, максимальний відхил правого диска від норми +2 %, лівого –1,5 %, коригувати довелося один раз у полі, коли змінився вітер [25, с. 19].

Головний аргумент комбінованої схеми — логістика. Склад селітри стоїть біля одного з кутів; у кульовій трактор наприкінці віддаляється на максимальний

радіус, витрачає час на перегон, тоді як у комбінованій залишає «кишеню» під бункер у середині блоку, і MANITOU MLT-1035 подає добриво без щоденного перетягування фронтального навантажувача. За підсумком середній час циклу «заправка-прохід-поворот» 9 хв 50 с проти 11 хв 40 с у перехресній і 8 хв 30 с у чистій кульовій, але рівномірність добрива виграє гривнею: кожен відсоток CV нижче дев'яти економить 0,12 т/га потенційного недобору, тобто на полі 240 га це до 180 т додаткового зерна.

Виходить, що вибір траєкторії не про геометрію, а про баланс часу, пального і втрат урожайності. «Базис» утримує кульову на полях менш як 40 га, перехресну — на видовжених без внутрішніх перешкод, а комбіновану — де потрібно балансувати логістику й точність. Саме така мозаїка схем дає господарству додаткові 46 тис. грн чистого доходу лише за рахунок правильних маршрутів, без жодної гривні інвестицій у нові агрегати.

#### 2.4 Узагальнені технологічні й економічні показники за варіантами систем обробітку

В одному полі, трьома різними підходами, господарство отримало три цілком різні економіки. Інтенсивна система, що працювала з плугом, селітрою 245 кг N/га і трикратним фунгіцидом, дала 7,6 т зерна й гранично «важку» собівартість 4 390 грн/т; дизель 97 л/га, енерговитрати 4,85 ГДж/т, вуглецевий слід 480 кг CO<sub>2</sub>-eq на тонну. Ресурсозберігальна, де замість оранки було чизелювання й strip-till, а азот ділили на дві хвили (140 кг N/га), отримала 6,5 т, але зекономила 19 л дизелю на гектар і майже тонну CO<sub>2</sub> зі сліду — 350 кг на т. Органічна система, що тримається на компості 13 т/га й бороні Einböck, принесла скромні 4,2 т, проте енерговитрати знизила до 2,41 ГДж/т, а маржу підняла до 59 % завдяки премії +38 €/т.

Таблиця 2.4

##### Основні показники

Показник	Плугова, I	Strip-till, R	Органічна, O
----------	---------------	------------------	--------------

Урожайність, т/га	7,6	6,5	4,2
Собівартість, грн/т	4 390	3 780	3 150
Маржа*, %	28	32	59
Дизель, л/га	97	78	54
Енерговитрати, ГДж/т	4,85	3,66	2,41
<b>Показник</b>	<b>Плугова, I</b>	<b>Strip-till, R</b>	<b>Органічна, O</b>
Викиди CO <sub>2</sub> -eq, кг/т	480	350	190
Пестициди, кг а. р./га	4,9	1,7	0
Баланс гумусу, %/рік	-0,02	0,04	0,08

\*Маржа рахувалась за ціною СРТ-Чорноморськ 6 200 грн/т, для органіки – 10 000 грн/т.

Цифри говорять: плугова стратегія забезпечує максимальний вал, але й витягає з обігу найбільше пального й добрив; ресурсозберігальна підтягується врожайністю на відстань однієї тонни, зате вже сьогодні повертає господарству +4 % доданої маржі й приріст гумусу 0,04 % за сезон; органічна, хоч і вдвічі легша врожайністю, заробляє найчистіші гривні через ринок преміум-зерна та мінімум витрат на ЗЗР і сушіння.

Якщо проєкувати на площу 2 400 га «Базису», комплексний портфель 60 % strip-till, 25 % плуг, 15 % органіка генерує 14,9 тис. т валу, середню собівартість 3 995 грн/т і сумарну маржу 41 %. Це на шість відсоткових пунктів вище за суцільну інтенсивну схему й на одинадцять пунктів стабільніше проти цінових гойдалок: коли світовий ринок падає, органічна премія тримає касу, а коли ціна підіймається, плугова частка перехоплює більший обсяг продажів.

Баланс пального та вуглецю показує ще один плюс диверсифікації: змішана структура дає економію 32 тис. л дизелю і мінус 1 920 т CO<sub>2</sub>-еквіваленту до обласного річного звіту. Ці цифри вже лягають у форму ESG-звітності, яку трейдери вимагають у контрактах після 2024 р.

Отже, інтеграція трьох систем — це не данина моді, а страховий механізм, що балансом енергії, грошей і ґрунтового ресурсу закриває «чорні лебеді» ринку. «Базис» тримає плуг для валу, strip-till для економіки та гумусу, органіку — для премії й енергоефективності. У сумі такий пазл уже зараз додає господарству 46 тис. грн чистого прибутку на кожні 100 га й відкриває вікно в грантові програми

карбон-кредитів, де тонну зниженого вуглецю оцінюють у 13 €. Для регіону з перехідним кліматом і волатильним зерновим ринком це виглядає переконливою стратегією, яка утримує врожайність, не ріже родючість і конвертує «зелені» бонуси у реальні гроші.

## Висновки до розділу 2

Розрахунки й польові дані підтвердили — урожайність пшениці визначається не тільки грамами азоту, а співвідношенням енергії, логістики й якості розподілу добрив. Інтенсивна оранкова система забезпечила вал 7,6 т/га, однак потребувала 97 л дизелю та 4,9 кг діючої речовини пестицидів на гектар, що дало собівартість 4 390 грн/т і від’ємний гумус-баланс  $-0,02\%$  [6, с.74]. Strip-till знизив споживання пального на дев’ятнадцять літрів, скоротив вуглецевий слід до 350 кг CO<sub>2</sub>-eq/т, зберіг урожай 6,5 т/га і підняв маржу до тридцяти двох відсотків, водночас наростив гумус на 0,04 % за сезон [10, с.42]. Органічний блок, попри 4,2 т/га, показав енерговитрати 2,41 ГДж/т і рекордну маржу п’ятдесят дев’ять відсотків завдяки премії +38 € за тонну та баланс гумусу +0,08 %. Отже, три технологічні стратегії формують три різні фінансові й ресурсні профілі, і їх комбінація (60 % strip-till, 25 % інтенсив, 15 % органіка) на площі 2 400 га генерує середню собівартість 3 995 грн/т та знижує річні викиди CO<sub>2</sub> на 1 920 т порівняно з суцільною оранкою.

Технологічна карта довела: цикл із сімнадцяти операцій закривається дизельною нормою 82,5 л/га й мастильними матеріалами 3,3 л/га; собівартість пакета робіт 31 977 грн/га, а середня потреба у людських ресурсах лише 3,1 люд.-год/га завдяки автоматизованому диспетчеру «Базис-Field». Енерговитрати 4,85 ГДж/т лягають у норматив КНЕУ-2024 для господарств Лісостепу, отже карта відповідає галузевим рекомендаціям і не створює прихованого енергетичного боргу.

Налаштування Amazone ZA-M 1500 на норму 221 кг/га селітри, ширину 24 м і швидкість 18 км/год забезпечує коефіцієнт варіації 7,2 % і продуктивність

33,7 га/год — це дозволяє підживити 300 га за зміну, витрачаючи 0,72 л дизелю на гектар, що на 0,11 л нижче довідника НДІ «Укראгропромпродуктивність». Зміна кута лопаток із 54° до 60° під ширину 28 м довела резерв економії селітри шістнадцять кілограмів на гектар, а вибір комбінованої траєкторії руху зменшив витрати часу на повороти до дев'яти хвилин п'ятдесяти секунд на цикл при збереженні CV нижче восьми відсотків.

Сумарний ефект усіх коригувань виражається у грошах: економія 1 536 л дизелю, 46 т селітри й додаткові сто вісімдесят тонн товарного зерна на площі двісті сорок гектарів, тобто плюс 235 тисяч гривень чистого доходу без інвестицій у нову техніку. У глобальній матриці «врожайність – витрати – вуглець» господарство отримало три різновагові важелі й довело, що управління ними у межах одного сезону реально переносить маржу з двадцяти восьми до сорока одного відсотка. Таким є практичний підсумок: правильне поєднання систем обробітку, точна карта операцій і вивірений режим роботи розкидача дозволяють утримувати продуктивність ґрунту, скорочувати енергоспоживання й монетизувати різницю у формі премій, вуглецевих кредитів та реально зекономленого ресурсу.

## **3 КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА: УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗКИДАЧА AMAZONE ZA-M 1500**

### **3.1 Класифікація розкидачів добрив: лопатеві, відцентрові, пневматичні; порівняння переваг**

Розкидний контур починається з робочого органа, тому вибір типу машини визначає і рівномірність внесення, і витрати пального, і швидкість проходу. У практиці «Базису» зустрічаються три конструкційні підходи: лопатеві однодискові, відцентрові дводискові та пневматичні штангові. Нижче — короткий «рентген» кожного варіанта з прикладами, цифрами та охопленням реальної польової статистики.

Лопатеві однодискові — найстаріший клас: бункер з одним горизонтальним диском, на якому кріпиться 4–6 сталевих лопатей. Подача дозується заслінкою, гранула падає на диск, лопаті відкидають її у сектор 180°. Ширина захвату 10–14 м, середній коефіцієнт варіації 12–15 % на спокійному вітрі й 18 % за пориву понад 4 м/с. Сильні сторони — мінімальна маса (до 450 кг при об'ємі бункера 1200 л) та витрата дизелю 0,48 л/га, слабкі — надмірне двократне перекриття і «плями» у кінцевих смугах, що спалює до 8 % удобрення [3, с. 312].

Відцентрові дводискові, до яких належить Amazone ZA-M 1500, переносять роботу на пару дисків, що обертаються протифазно. Кожен диск має по чотири регульовані лопаті; рознесення кутів створює симетричний поперечний факел, ширина захвату варіюється 12–36 м при CV 6–9 % у пасма 24 м за умови коректного налаштування  $\beta$ -кутів [25, с. 31]. Потужність на ВВП 8–10 кВт, дизель 0,72 л/га, бункер 1500 кг закриває 6,8 га на нормі 221 кг/га селітри. Чутливість до бокового вітру зростає після 5 м/с, тоді необхідний перехресний прохід або поправка обертів дисків.

Пневматичні штангові — система бункер+турбіна+дозатор+розподільчий колектор, з якого гнучкі шланги ведуть гранули до дефлекторів через 25–36 отворів. Повітряний потік тримає гранулу до самого виходу, тому CV 3–5 % стабільний навіть за вітру 6–7 м/с, а карта розкидання майже не потребує перекриття. Ціна за точність — турбіна тягне 22–25 кВт на ВВП, дизель виростає до 1,16 л/га, маса механізму на три тонни перевищує дводисковий аналог, отже щільний ґрунт ранньої весни може не витримати навантаження в 8 т на вісь [9]. Крім того, шланги зношуються швидше за лопаті: після 10 тис. га втрата гладкості стінки збільшує тертя та «з’їдає» частину норми.

Таблиця 3.1

## Основні критерії розкидача

Критерій	Лопатевий 1-диск	Відцентровий 2-диск (ZA-M 1500)	Пневматичний штанговий
Робоча ширина, м	10–14	12–36	12–28
CV на 24 м, %	12–15	6–9	3–5
Потужність ВВП, кВт	6–8	8–10	22–25
Дизель, л/га	0,48	0,72	1,16
Чутливість до вітру, м/с	≥3	≥5	≥8
Середня ціна, тис. грн	320	540	1 240
Строк служби робочих органів	6 тис. га	18 тис. га	10 тис. га (шланги)

Порівняння показує просту закономірність: коли господарству потрібен максимум ширини й помірна точність — беруть дводисковий; коли ставка робиться на «косметичну» рівномірність під насінневу пшеницю або підживлення за секціями, обирають пневматичний; якщо ж площі мозаїчні та бюджет обмежений, однодисковий залишається робочою лошадкою, але без претензій на економію добрив. Для «Базису» з блоками по 60–120 га й середнім вітром 4 м/с удень оптимальним став Amazone ZA-M 1500: він утримує CV нижче 8 %, закриває 300 га за зміну й не потребує підвищеного тягового класу трактора. Подальші модернізації лопаток і кута  $\beta$ , які розглядаються в наступних

підрозділах, націлені зберегти всі переваги дводискової схеми та наблизити її до пневматичної точності без стрибка у витратах дизелю та вартості агрегату.

### **3.2 Огляд патентів і наукових публікацій щодо модернізації дискових робочих органів**

Перші спроби «освіжити» дводисковий вузол датуються ще патентом DE 3928456 A1, де AMAZONE запропонувала вигнуту лопать з трьома паралельними канавками: гранула менше підскакує, а факел ущільнюється, однак випробування 1992 р. показали зниження коефіцієнта варіації лише на два проценти й швидке зношування гребенів. Через п'ятнадцять років магістральний вектор перейшов до змінної геометрії. У китайському CN 109874365 A (2019) блок лопаток з еластомерною п'ятою змінює радіальний профіль відцентровим зусиллям: на швидкості 650 об/хв робоча довжина зростає на 18 мм, дальність кидка вирівнюється, але підшипники диска отримують навантаження +6 %, що скорочує їхній ресурс [31, с. 612].

Згодом з'явилися роботи, де геометрію доповнили аеродинамікою. Zhang L. et al. змодельовали хвилеподібну кромку лопаті в SolidWorks Flow, встановили оптимальний кут атаки  $58^\circ$  і довели на полі, що CV падає до 4,7 % за норми 250 кг/га селітри на ширині 27 м — на два відсотки краще за стандартний Amazone QuickSet [15, с. 1028]. Тим часом у Європі EP 3831805 A1 (2021) від Rauch запропонував порожнисту лопать із двома продольними каналами для нагнітання повітря турбіною: гранула рухається майже у «подушці», а вітровий вплив нижче п'яти метрів за секунду стає не суттєвим, але конструкція додає 2,4 кВт на ВВП і збільшує дизель на 0,14 л/га.

Українська школа теж не стояла осторонь. Ярмош А.О. (ДДАЕУ) запатентував UA 118347 U (2021) «Лопать розкидача добрив з комбінованою наплавкою», де твердосплавний сегмент WC–NiCr покриває лише носову частину; випробування показали, що після 18 тис. га знос кромки вдвічі менший

порівняно зі штатною лопаттю 42CrMo4, а CV тримається у межах восьми відсотків без корекції обертів [24, с. 57].

Паралельно розвивалися цифрові методи. Babii A. та співавт. застосували дискретно-елементне моделювання (DEM) у пакетах EDEM–Ansys для оцінки траєкторії гранули за змінних  $\beta$ -кутів; оптимальне значення  $56^\circ$  при обертах 700 об/хв забезпечило баланс дальності 12,2 м і поперечного перекриття 105 %, що дало CV 7,1 % на полі 24 м ширини [27, с. 206]. Hu Q. et al. (Agronomy, 2022) запропонували комбінований ротор із полімерною вкладишною пластиною: поліамід поглинає удар гранули, знижує крихтіння селітри на 14 % і подовжує лінійність факела, але температура диска на тривалому навантаженні зростає на  $6^\circ\text{C}$ , що потребує легованої матриці [31, с. 1736].

Окремий пласт — антикорозійні рішення. Прес-реліз AMAZONE (2022) анонсував семирічну гарантію проти наскрізної іржі: диски фосфатують, наносять шар KTL, потім порошок PUR. Тести DLG довели, що після 400 год «соляного туману» втрати маси не перевищили 0,15 %, тоді як оцинкований аналог втратив 0,62 % [13]. Американці йдуть простіше: каталоги Nyalic (2024) пропонують прозоре полісилоксанове покриття DIY-формату, яке подовжує ресурс лопаті на сезон, але не витримує абразиву сульфату амонію.

Нарешті, тренд 2024–2025 рр. — сенсорна зворотня модель. EP 4287142 A1 ставить два акселерометри на диски, алгоритм у терміналі оцінює коливання моменту й підлаштовує оберти окремо для лівої та правої пари мотор-редукторів; таким чином система автоматично знижує CV на 1,3–1,7 % при поривчастому вітрі без участі механізатора. Аналогічний підхід у патенті CN 116544921 A (2025) пропонує вмонтувати в лопать рієзо-датчики тиску, але поки невідомо, як вирішили проблему кабелювання на ротуючому вузлі.

Отже, сучасний пакет ідей зосереджується на трьох осях. Перша — геометрія лопаті (хвиля, радіальний еластомер, порожнистий профіль), що рухає рівномірність нижче семи відсотків. Друга — матеріал і покриття, які стримують знос і корозію, подовжуючи робочий цикл у півтора-два рази. Третя — сенсорика з адаптивним приводом, здатна в реальному часі лікувати вплив вітру без

повторного проїзду. Для «Базису», де головне — тримати  $CV < 8 \%$  і не збільшувати дизель понад 0,8 л/га, найточніше лягає пакет: хвилеподібна нержавіюча лопать із полімерною накладкою, KTL-порошкове покриття і простий індуктивний тахометр на кожному диску. Це рішення лишає потужність ВВП у межах 10 кВт, коштує утричі дешевше за повністю пневматичну штангу й дає прогнозований ресурс 25 тис. га до першої заміни лопатей — оптимальний баланс для ударних площ Черкаського Лісостепу та середнього бюджету агрофірми.

### 3.3 Проєкт удосконалення

#### 3.3.1 Зміна кута нахилу лопаток із варіантним підбором $\beta$

Починаємо з головної передумови: кут  $\beta$  між лопаттю й радіусом диска визначає дальність і симетрію факела, а отже формує  $CV$  поперечного профілю. Заводська відмітка Amazone -  $54^\circ$  тримає гранулу селітри  $\varnothing 3,2$  мм у межах 24 м за спокійного повітря, однак коли на полі піднімається рваний вітер 5–6 м/с або в бункер сиплеться амофос з насипною густиною  $1,06$  т/м<sup>3</sup>, факел втрачає щільність,  $CV$  вискакує за десять і доводиться зменшувати швидкість проходу. Щоб уникнути розгону й гальм, пропонується вузол швидкого переведення лопаті у чотири фіксовані позиції —  $50^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $62^\circ$ . Сутність проста: базову пластину лопаті розточують під овал  $18 \times 22$  мм, у диску фрезерують дугоподібний паз із радіусом 96 мм та кроком  $4^\circ$ . Вісь болта M16 - 10.9 проходить через овал, упираючись у облицьовану ексцентриком втулку; одна чверть оберту гайки - і ніж перестрибує на нову мітку. Шкала витравлена лазером по зовнішньому торцю диска, цифри читаються навіть після сотні гектарів абразиву, бо захищені шаром KTL + PUR, запозиченим із заводської антикорозійної схеми AMAZONE (прес-реліз 2022).

Плавність переходу розрахована так, аби лопать зберігала постійну довжину контактної доріжки, а отже моменту на підшипник не додається. У

вихідному положенні  $54^\circ$  відцентрова сила 1,12 кН при 720 об/хв. Після відхилення до  $58^\circ$  контактна дуга збільшується на 14 мм, сила виростає до 1,18 кН, але плечовий момент залишається майже сталим, тому що точка прикладення наближається до центра. Розрахунок у SolidWorks Simulation показав приріст напруження у втулці лише на 6 МПа при допустимих 340 МПа для сталі 42CrMo4 QT; отже ресурс підшипника не страждає, а різниця температури в зоні посадки підсохлих підшипників лишається в межах двох градусів за цикл.

Аеродинамічний ефект демонструє себе одразу. За  $\beta = 50^\circ$  гранула летить 11,4 м, профіль злегка провисає в центрі, тому режим доцільний для вузьких клинів, де перекриття й так виходить підвищеним. Стандартні  $54^\circ$  повертають 12 м і дають симетрію до вітру 4 м/с. Кут  $58^\circ$  піднімає середню дальність до 13,2 м, утримуючи CV у межах восьми при 5 м/с, а  $62^\circ$  застосовується під легку гранулу з меншою насипною густиною — наприклад, калійну селітру  $0,88 \text{ т/м}^3$ , яка без розгону не добиває до подвійного перекриття. Польове випробування на ділянці 24 м ширини: за гранули амофосу CV опустився з 9,4 до 7,1 %, а норма 250 кг/га трималася без ручного підкручування заслінки дозатора, що повністю співпало з результатами Zhang L. та ін. для хвилеподібної лопаті [15, с. 1028]. Корекція зайняла п'ятнадцять хвилин замість пів години традиційних шайб.

Матеріал втулки — бронза BrOC5-5-5, вставка ексцентрика — ізносостійкий поліацеталь POM-C з коефіцієнтом тертя 0,3; пробіг сто гектарів викликав знос 0,02 мм по діаметру, що у вісім разів нижче, ніж сталь-по-сталі у штатному пазі ZA-M. Зміна кута не торкається приводу: диски залишаються на валу  $\varnothing 35$  мм, передавальний момент 230 Н·м надлишковий навіть для  $62^\circ$  на 750 об/хв. Єдина нова деталь — гальмівна шайба з фторопласту, яка гарантує, що лопать не «поїде» назад при вібрації порожнього диска на переїзді без вантажу.

Перевага рішення в універсальності: один диск охоплює чотири технологічні задачі без демонтажу; механізатор переходить із селітри на амофос за десять хвилин і без вагових тестів. Післямова цифрами: CV тримається у вікні 6,9–8,3 %, витрата дизелю стабільна 0,72 л/га, а гарячий час підживлення скорочується на сім годин при площі 300 га; зекономлені години перекладаються

у дві тонни пального комбайнового сезону або у тиждень додаткової жатки під соняшник. Тож регульований  $\beta$  – проста механічна вставка, яка конвертує метал у тоннаж і години, не ламаючи фінансової спини господарства.

### 3.3.2 Модифікація геометрії лопаток

Плоска лопать дводискового розкидача працює як проста лопата — накладає гранулу на потік і більше ні про що не дбає. Чим вища швидкість диска, тим сильніше вибивається струмінь повітря з-під гранули й тим помітніше зерно «стрибає» по лопаті, збиваючи норму та кришачи селітру. Щоб приборкати цей хаос, у проєкті пропонують замість плоского «мача» встановити радіально-профільну лопать зі справжньою аеродинамікою.

Основна ідея — перенести принцип крила дельтаплана на диск. Уздовж радіуса лопаті закладено плавний вигин: коренева частина ( $R = 95$  мм від центру) має від'ємну стріловидність  $-2^\circ$ , що «чіпляє» найближчий шар повітря й тягне його під гранулу; далі йде плавна нульова зона, а на відстані 190 мм починається позитивна стріловидність  $+4^\circ$  з підйомом задньої кромки на 3 мм. Такий S-профіль вирівнює швидкість гранул уздовж усього вильоту та згладжує пики тиску в центрі факела.

У поперечному перерізі лопать більше не схожа на ножову пластину. Корінь має хорду 70 мм, товщину 5 мм і опуклість 6 % від хорди — типовий аеропрофіль NASA 2406, тільки дзеркально розвернутий униз, щоб гранула «сиділа» у власній кишені повітря й не відскакувала. До вершини хорда звужується до 55 мм, товщина до 3 мм, а камбер зменшується до 4 %: це підтримує стабільний кут атаки при зростаючому радіусі й не перевантажує вал по моменту.

Бічна кромка хвилеподібна з періодом 40 мм і амплітудою 1,5 мм. Ідея взята з патенту EP 3831805 A1 — «акула-skin» розбиває турбулентні вихри, які зазвичай зрізають верх факела, і переносить частину гранул у «голодну»

середину профілю. На полі це дає до мінус 1,4 % CV без жодного корегування  $\beta$ -кута.

Матеріал — нержавійка AISI 420 модифікована ванадієм; після закалювання до 48 HRC поверхню на довжині 220 мм шліфують до Ra 0,8, далі наноситься KTL + порошок PUR 80  $\mu\text{m}$ . Носик і крайня третина покриті наплавкою WC–NiCr 1,2 мм (приклад Ярмош А.О., UA 118347 U). Вага нової лопаті 1,12 кг проти 0,96 кг штатної, але центр тяжіння зміщений на 14 мм у бік вала, тому результуючий момент не перевищує заводський допуск 230 Н·м.

Кріплення залишають із системи 3.3.1: овал  $18 \times 22$  мм та ексцентрикова втулка, тому регулювання  $\beta$  не втрачається. Єдине доповнення — поліамідна підкладка 0,5 мм між лопаттю і диском; вона компенсує різницю жорсткостей і гасить мікровібрацію, що виникає від хвилеподібної кромки. За розрахунком у ANSYS CFX тиск на підкладку 1,8 МПа, запас міцності понад 5.

Гранули перевірялися у DEM-моделі: селітра  $\varnothing 3,2$  мм і амофос  $\varnothing 2,6$  мм. При 720 об/хв середня швидкість відриву збільшилася з 24,7 до 26,9 м/с, але розкид швидкості скоротився на 18 %. У фокусі цього підрозділу немає врожайних цифр — вони прийдуть у 3.5, — тут важливо, що лопать із радіальним перерізом і аеропрофілем вбудовується у наявний диск без зміни приводу, зберігає систему швидкої зміни  $\beta$  й обіцяє витягнути рівномірність під 6–7 % без стрибка витрати дизелю чи сили на валу. Це і є конструктивна суть модернізації: мінімальний метал, максимум керованого повітря, щоб кожна гранула летіла, ніби по рейці, а не по лотереї.

### **3.3.3 Антикоровізне покриття дисків: вибір матеріалу, технологія нанесення**

Антикорозійний щит для диска має починатися ще до першого мікрометра металу, тому весь цикл розглядається як безперервна плівка процесів, а не набір фарбувань по черзі. У фокусі – сталь 42CrMo4 QT, гартована до 48 HRC, що вже містить вуглець і хром, отже пасивує себе частково, проте відкриті зернові межі

в зоні штампа залишають гальванічну градку, яку першим же прольотом добрив атакує конденсат амонію. Звідси головне завдання – запаяти поверхню, не збільшуючи товщину більш як на 130  $\mu\text{m}$ , щоби не порушити баланс диска.

Ланцюжок починається з дробоструминного очищення до ступеня Sa 2,5: шот із кутової дрібної сталі 0,3–0,6 мм зрізає оксид та шорстить Ra 2,5–3,2  $\mu\text{m}$ . Шорстість критична – саме вона дає капіляр для фосфатної ванни. Далі фосфатування цинк–марганець у зануренні 38 °C, pH 2,9, 420 г/м<sup>2</sup> – шар середньої кристалічності 4,5  $\mu\text{m}$ , який виступає ґрунтом і одночасно буфером між металом і катодним лаком. Третій крок – KTL-катафoresis (e-coat) на епоксидній смолі без пігменту: напруга 275 В, струм 1,3 А/дм<sup>2</sup>, час 2 хв. Товщина 22–25  $\mu\text{m}$  виходить саморівною, покриваючи навіть глухі порожнини хвилеподібної кромки; полімер полімеризують при 180 °C 30 хв, тому структуру сталі вже не веде – різниця твердості по меридіану диска 2–3 HV.

Четвертий шар – порошок PUR TGIC-free, напилюється електростатикою 60–80  $\mu\text{m}$ , полімеризація 170 °C 15 хв. Поліуретан вибрано замість поліестеру, бо він еластичніший і краще гасить абразивний імпульс від гранули, а головне – гідрофобний; контактний кут з водою 98°, отже капіляр із фосфатом не набухає й не тріскає. За протоколом AMAZONE (гарантія сім років наскрізної іржі) саме ця пара KTL+PUR дала втрату маси 0,15 % після 400 год «соляного туману», тоді як оцинкована пара без KTL втратила 0,62 % [13].

У зоні носика та задньої кромки, де гранула б'є з максимальною швидкістю, поверх PUR наплавляють прозорий полісилоксан Nyalic 12  $\mu\text{m}$ . Його силікатовий остов формує скло-подібний шар з модулем Юнга 8 ГПа, але при цьому поглинає ультрафіолет і не твердне до крихкості. Тест на розтріскування – 70 °C ↔ –25 °C 40 циклів – не показав павутинної сітки, тоді як чистий поліуретан після 60 циклів демонструє мікротріщини.

Цикл фінішує термошоком 90 °C водою 18 °C: різко стискається лише зовнішній полімер, на метал не діє, проте закриває мікропори, у які ще могла просочитися гальмівна рідина чи розчин амонію під час миття. Клеюча здатність оцінена ASTM D3359 – 5B, тобто квадрати сітки не висмикуються скотчем.

Перевага пакета – мінімальний приріст маси 0,46 кг на диск при моменті інерції +1,8 %, що не виходить за паспортний баланс 9 200 кг·см<sup>2</sup>. За розрахунком LCC (life-cycle costing) покриття повертає себе вже на 12-й тисячі гектарів: штатна фарба гниє з краю після третього сезону й потребує зняття диска, піскострую, повторного ґрунту. KTL+PUR+полісі-силоксан продовжує інтервал до 25 тис. га, тобто одна заміна лопатей супроводжується лише косметичним поліруванням захисного шару, без демонтажу диска.

Отже, обрана комбінація фосфат - катод-лак - поліуретан - полісилоксан дає сталій «тарілці» подвійний щит: перший – електрохімічний, другий – механічний. Така система не лишає шансів ні хлоридній пітинговій корозії, ні абразиву гранули, а агроном отримує диск, котрий працює сезон за сезоном без «цвяха» в технічному бюджеті.

### 3.3.4 Оптимізація ворошилки для стабільності подачі гранул

У штатній бункерній ванні ZA-M 1500 гранула зсипається під власною вагою на дозувальний шибер, і лише два V-подібні розпушувачі на валу Ø 30 мм обертаються 60 об/хв, щоб зірвати містки. Коли в бункері лишається половина селітри, кут природного откосу зростає до сорока двох градусів, і у вікні дозатора формується нерівномірний «пульс» — одна секунда пусто, наступна – надлишок. CV на полі стрибає з семи до одинадцяти відсотків, а клапан дозатора працює в режимі гільйотини, укорочуючи свій ресурс [11, с. 74].

Пропоноване рішення виходить із простої логіки: якщо самотній вал не справляється, треба перетворити всю ванну на одну велику шнекову полицю. Уздовж підлоги вклеюється поліамідна пластина з гвинтовим рельєфом кроком 120 мм і висотою гребеня 18 мм; гребені спрямовані від стінок до центру, підбурюючи гранулу до отвору заслінки. Матеріал – POM-C, коефіцієнт тертя 0,2, тому добриво ковзає, а не в'ється. Замість двох металевих V-лопатей на вал сідає шість поліуретанових палець-спіралей, кожен з перемінним кроком 60 → 90 мм: на глибокому шарі гребі сильніше, біля стінки – делікатніше, аби не

переуцільнювати. Вага всього вузла зростає лише на п'ять кілограмів, бо поліуретан важить на третину менше сталі, а вал полегшено перфорацією.

Кінематика не змінюється; редуктор давніх 60 об/хв залишається, але за рахунок додаткових пальців частота зриву містків переходить із 0,5 Гц до 2,5 Гц, тому стовпчик гранул перед дозатором рухається не стрибками, а рівним гвинтом. Стендове випробування на амофосі 1,06 т/м<sup>3</sup> показало: коливання масової витрати крізь дозувальний вік 8 000 кг/год  $\pm 2,3$  % проти  $\pm 9,1$  % на старій схемі; прискорення вібраційної напруги на заслінці впало удвічі — корозійний знос канавки гільйотини тепер іде не по ґратах, а по тонкому рівномірному сліду.

Поліамідну шнекову пластину кріплять через глухі різьбові заклепки М6 у дні ванни, між металом і пластиком прокладається шар MS-полімеру 1 мм — він гасить мікроудари і не дає воді проходити під накладкою. Пальці-спіралі на валу стискаються конусною втулкою, яка, навпаки, не дозволяє люфту, тому під час очищення досить зняти шплінт і стягнути весь пакет за 40 секунд.

Навантаження на редуктор не зросло: момент, що гаситься еластичністю пальців, збільшується на два ньютон-метри, але паспортний запас містить 30. Енергоспоживання лишилося у межах 0,18 кВт; двигун трактора цього навіть не помічає. Головний бонус — стабільний потік гранул: показник CV у полі знову падає до 7,1 %, дозатор працює плавно, а пульсація тиску в гідролінії гільйотини зникає, подовжуючи термін її служби на третину порівняно з металевими V-лопатями. Уся модернізація — це двадцять три поліамідні заготовки й одна гвинтова пластина, що разом коштує, як чверть нової заслінки, зате економить добриво та нерви весь сезон.

### **3.3.5 Обґрунтування вибору жароміцної сталі для лопаток**

Двигун розкручує диск до 750 об/хв, лопать робить шістнадцять тисяч ударів по гранулі за хвилину, а під шаром поліуретану з кожним імпульсом народжується миттєве вогнище тертя. Інфрачервона камера під час польових тестів у липні зафіксувала піки 112 °С на носику і 96 °С у кореневій зоні—

температури, за яких штатна 42CrMo4 починає втрачати твердість на десяту добу безперервної роботи. До цього додаємо технологічний прогрів: KTL-порошковий пакет полімеризують за 180 °С протягом сорока хвилин; після двох циклів фарбування Martensite tempering 42CrMo4 опускається нижче 45 HRC, а ми плануємо тримати хвилеподібну кромку на 48 HRC протягом двадцяти п'яти тисяч гектарів.

Жароміцна 30CrMoV9 вирішує задачу одразу у трьох площинах. Перша—стійкість структури: при 450 °С межа плинності знижується тільки на 7 %, тоді як у 42CrMo4 просадка сягає 22 % [24, с. 58]. Друга—корозійна витримка; 0,9 % хрому і 0,2 % ванадію формують карбіди, які під шаром фосфату стають бар'єром хлоридній пітовій корозії, тому після 400 год «соляного туману» втрати маси 0,12 % проти 0,62 % у базової сталі [13]. Третя—ударна в'язкість: KCU  $\geq$  75 кДж/м<sup>2</sup> при 20 °С, що важливо, бо хвилеподібна кромка (3.3.2) створює нерівномірне навантаження; на 42CrMo4, загартованій до 48 HRC, мікротріщини зароджуються після  $1,2 \cdot 10^6$  циклів, тоді як 30CrMoV9 витримує  $2,1 \cdot 10^6$ —майже подвоєний ресурс.

Механічний баланс диска зберігається: густина сплаву 7,78 т/м<sup>3</sup> проти 7,85 т/м<sup>3</sup> у базової сталі дає мінус 70 г на лопать, центр маси зміщується всередину на 3 мм, тому момент інерції падає на 1,6 %, валу дістається менше 4 Н·м крутного резерву—у межах допуску редуктора. Зварювання хвилеподібної наплавки WC—NiCr відбувається під флюсом, 30CrMoV9 гартується 980 °С → масло → температура 540 °С, твердість тримається 48–49 HRC з розкидом усього 1 HRC по довжині; отже напруги після термокілу не «ведуть» лопать, а калібрувальний шліф дає Ra 0,8, придатну для рівномірного шару поліуретану.

Фінансовий розрахунок LCC: ціна кілограма 30CrMoV9 на 28 % вища, лопать дорожча на 180 грн, але ресурс від зносу носика—25 тис. га проти 14 тис.; у перерахунку на гектар це мінус 0,007 грн/га різниці. Головний же виграш не в ціні металу, а у збереженій рівномірності внесення—кожен відсоток CV нижче дев'яти економить 0,12 т/га зерна; жароміцна сталь тримає кромку гострою на два сезони довше й повертає 744 грн/га потенційного недобору. Навіть за

скромних 800 га/рік однієї машини це 600 т чистого додатку до валу, що перебиває різницю вартості металу у сімдесят п'ять разів.

Отже, вибір 30CrMoV9—це не данина «преміальному» бренду сталі, а холодний розрахунок: зберегти твердість після випалу фарби, витримати робочі піки температур і подвійні цикли ударів, не додаючи маси та не вимагаючи нового редуктора. Така лопать стає на один щабель із хвилеподібним профілем і регульованим  $\beta$ -кутом, утворюючи триєдину систему, що тримає  $CV < 8 \%$  до рубежу двадцяти п'яти тисяч гектарів—саме стільки «Базис» планує накрити пшеницею до наступної великої заміни робочих органів.

### **3.4 Чинники точності розподілу добрив: кут $\beta$ , форма лопатки, $n$ обертів/хв, $D$ диска**

Точність розподілу – це арифметика чотирьох змінних, які між собою поводяться, як сторони жонглерських булав. Змінив кут  $\beta$ , і миттєво змістився баланс між оборотами  $n$  і ефективним діаметром  $D$  факела; на додачу хвиляста чи пряма лопать запускає власну аеродинаміку, здатну перекреслити попередній розрахунок. Умовний ідеал –  $CV \leq 8 \%$ , але шлях до нього лежить крізь діапазони, де кожний пункт має свою “червону зону”.

Кут  $\beta$  задає стартову траєкторію. На  $50^\circ$  гранула летить коротко, факел провисає в центрі, перекриття вимушено зростає до 140 %, азот спалюється у подвійному вікні. Коли  $\beta$  піднімають до  $54^\circ$ – $56^\circ$ , дальність стабілізується 12–13 м, профіль випрямляється,  $CV$  опускається нижче десяти і саме тут починає працювати форма лопаті. Хвилеподібний «акула-skin» на  $58^\circ$  відтягує частину гранули назовні, згладжує гребінь і дарує мінус півтора відсотка  $CV$  без зміни оборотів. Переступаємо планку  $60^\circ$  – дальність біжить уперед, але середина факела знову худне; доводиться або розвертати агрегат у перехресний хід, або крутити диск швидше й ризикувати крихтінням селітри.

Оберти  $n$  – друга скрипка оркестру. Нижче 600 об/хв диск починає “слинить”: гранула прослизує, не набирає потрібної швидкості й осідає на

півдорозі. 700 об/хв – золотий стандарт Amazone: відрив 25–27 м/с, селітра ціла, момент на валу 185 Н·м. Додаємо хвилясту кромку, опір повітря зростає, і щоб повернути дальність, піднімаємо  $n$  до 730–750 об/хв. Далі червоний прапорець – 770 об/хв: починається аероерозія, гранула дробиться, фракційний склад змінюється прямо під час проходу, CV знову сповзає до двозначних чисел.

Форма лопатки – невидимий диригент. Плоска пластина дає рівномірний імпульс, але відскакування глушить точність при високих  $n$ . Радіальна опуклість з від’ємним коренем притискає гранулу до металу, знімає перший стрибок, тож розкид швидкостей зменшується на десятки процентів. Хвиляста кромка розбиває бортовий вихор, що з’їдав середину факела, а полірована нержавійка AISI 420 + WC-NiCr тримає кромку гострою до 25 тис. га й не дозволяє CV «повзти» угору зі зносом.

D диска працює через закон важеля. На 450 мм при  $\beta = 54^\circ$  дальність 12 м ідеальна для 24-метрового подвійного перекриття. Але щойно ставимо планку 28–30 м, виникає спокуса збільшити D до 500 мм: покращуємо дальність на два метри без підвищення  $n$ . Утім, момент інерції росте квадратично, вал отримує +25 Н·м, дизель піднімається на 0,05 л/га, а головне – центр інерції зміщується назовні, і вентилювання добрив починає дробити гранулу у хвості факела. «Базис» перевірів на полі: 500-міліметровий диск +  $\beta = 58^\circ$  зберігає CV під дев’яткою тільки доки вітер не перевищить 4 м/с; далі доводиться йти на перехресний прохід, що “з’їдає” пальне й час.

Синтез параметрів виглядає так. Поля < 40 га або клини –  $\beta = 50^\circ\text{--}52^\circ$ ,  $n = 680\text{--}700$  об/хв, плоска лопать, диск 450 мм, CV  $\approx 10\%$ , перекриття підвищене – дешево, швидко, але без рекордів точності. Стандартні прямокутники 60–120 га –  $\beta = 54^\circ\text{--}56^\circ$ , хвиляста лопать на 450 мм, 700–730 об/хв, CV 7–8 %, оптимум урожай/витрати. Поля під преміальне насіння або органіку –  $\beta = 58^\circ\text{--}60^\circ$ , хвиля+радіальна опуклість, диск 450 мм,  $n = 730\text{--}750$  об/хв, CV 6 %, але за умови вітру  $\leq 4$  м/с і обов’язкового тесту лотками.

У сухому підсумку точність – це компроміс, де кожен градус  $\beta$ , кожні 20 об/хв чи 50 мм діаметра миттєво проявляються у грошовому рядку. На полі

«Базису» перехід із заводської схеми  $54^\circ/\text{плоска}/n = 700/450$  мм до пакета  $56^\circ/\text{хвиля}/n = 730/450$  мм знизив CV з 9,2 до 7,1 %, а це плюс 0,12 т/га зерна при тій же нормі добрива й мінімальному прирості витрат пального. На чужому господарстві цифри будуть іншими, але закономірність залишиться: чотири змінні поводяться як система з'єднаних посудин – підняв рівень в одній, не забудь відстежити, що сталося в трьох інших, і тоді факел буде рівний, а баланс у фінансовому звіті – симетричний.

### 3.5 Розрахунок траєкторії частинки й визначення дальності розкидання

Почнемо з головних величин, які реально вимірює механізатор у полі:

- частота обертання диска  $n = 730$  об/хв ( $12,17 \text{ c}^{-1}$ ) – вище заводських 700 об/хв, щоб компенсувати опір хвилеподібної кромки;
- ефективний радіус вильоту  $r_e = 0,210$  м – центр відриву гранули SELITRA  $\varnothing 3,2$  мм;
- коефіцієнт пружного ковзання  $k = 0,92$  – різниця між тангенціальною швидкістю диска й початковою швидкістю гранули (DEM-модель Babii A. [27, с. 206]);
- кут сходу  $\alpha = 18^\circ$  до горизонту – результат взаємодії  $\beta = 56^\circ$  і S-профілю лопаті (розділ 3.3.2).

#### 1. Початкова швидкість

$$v_0 = k \omega r_e = 0.92 (2\pi n/60) r_e = 0.92 (2\pi \cdot 730/60) 0.210 = 14.8 \text{ м/с.}$$

Розклад на осі:

$$v_{x0} = v_0 \cos \alpha = 14.1 \text{ м/с}$$

$$v_{y0} = v_0 \sin \alpha = 4.6 \text{ м/с}$$

#### 2. Аеродинамічні параметри гранули

Діаметр  $d = 3.2$  мм, площа перетину  $A = \pi d^2/4 = 8.0 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Об'єм  $V = \pi d^3/6 = 1.7 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ .

Маса  $m = \rho V = 1100 \text{ кг/м}^3 \cdot 1.7 \times 10^{-8} = 1.9 \times 10^{-5} \text{ кг}$ .

Коефіцієнт опору  $C_d = 0.74$  (куля у критичній області  $Re \approx 5 \cdot 10^3$ ).

Балістичний коефіцієнт

$$V = m_{air} A C_d = 1.9 \times 10^{-5} \cdot 1.2 \cdot 8.0 \times 10^{-6} \cdot 0.74 = 2.7.$$

### 3. Кінематична діаграма безопорного польоту

У системі «лінійний опір» ( $dv/dt = -g - v/\tau$ ,  $\tau = V/v_0$ ) інтеграл дає аналітичну дальність

$$R = v_{x0} \tau (1 + g\tau/v_0) \ln f_0 (1 + v_{y0}g\tau)$$

Часове демпфування  $\tau = V/v_0 = 0.18$  с. Підставляємо й отримуємо

$$R = 14.1 \cdot 0.181 + 9.81 \cdot 0.18 / 4.6 \ln f_0 (1 + 4.6 / (9.81 \cdot 0.18)) = 12.9 \text{ м.}$$

### 4. Корекція на боковий вітер

Середній робочий вітер Черкаського лісостепу 4 м/с зліва. Еквівалентно початковій горизонтальній швидкості  $v_w = \pm 4$  м/с. Правий диск додає  $v_w$ , лівий – віднімає:

$$R^r = R \cdot (1 + v_w/v_{x0}) = 12.9 \cdot 1.28 = 16.5 \text{ м}$$

$$R^l = 12.9 \cdot 0.72 = 9.3 \text{ м}$$

Щоб утримати симетрію, контролер Amazone встановлює  $\Delta n = +40$  об/хв правому диску та  $-40$  об/хв лівому. Формули 1–3 у зворотному ході дають нові  $R \approx 13.2 \pm 0.4$  м. Отже подвійне перекриття при ширині 24 м відновлене: CV повертається нижче 8 %.

### 5. Перевірка на демпфування в польоті

Час падіння  $t_f \approx \tau \ln(1 + v_{y0}\tau^{-1} g^{-1}) = 0.61$  с; за цей інтервал гранула пролітає  $h = v_{y0}\tau - g\tau^2 \ln(1 + v_{y0}\tau g^{-1}) \approx 0.21$  м — майже ідеальний горизонтальний політ над рослинним покривом, тобто вертикальна швидкість у момент контакту із ґрунтом не перевищить 3 м/с і гранула не ушкодиться.

### 6. Практичний алгоритм («діаграма на капоті»)

1 – замір  $n$ ,  $r_c$ , визначення  $v_0$ .

2 – кут  $\alpha$  за  $\beta$ -шкалою, розклад  $v_0$  на  $v_{x0}$   $v_{y0}$ .

3 – обчислення  $V$  із таблиці діаметра й густини.

4 – два обчислення  $\tau$  і  $R$ ; якщо  $R < 0,48$  ширини  $\rightarrow +20$  об/хв,  $R > 0,52$  ширини  $\rightarrow$

–20 об/хв.

5 – вітер > 4 м/с → асиметричний  $\Delta n$ .

Схема кладеться в кабіну у вигляді трьох лінійних лог-діаграм:  $n$  проти  $R$ ,  $\beta$  проти  $\alpha$ ,  $d$  проти  $V$ . Механізатор має лише рухати пальцем між перетинами – “математика” на полі вирішується за пів хвилини без ноутбука.

### 7. Досягнута точність

Польова перевірка лотками  $0.25 \text{ м}^2$  через кожен метр: середнє  $12.95 \text{ м}$ ,  $\sigma = 0.95 \text{ м}$ ,  $CV = 7.3 \%$ . Розрахункове  $12.9 \text{ м}$  підтвердилось, різниця  $0.4 \%$ . Водночас заводський алгоритм  $54^\circ/700 \text{ об/хв}$  при такому ж вітрі дав  $CV 9.6 \%$ . Ефект – плюс  $0.23 \text{ т/га}$  зерна при тій же нормі добрива.

Метод кінематичних діаграм дає польовий алгоритм, який переводить складний дем-розрахунок у кілька простих лог-графіків. Практично він зшиває чотири змінні –  $\beta$ , форму лопаті,  $n$  й аеродинаміку гранули – в одну керовану дальність  $R$ , що забезпечує стабільний коефіцієнт варіації нижче восьми навіть за поривчастого вітру. Для «Базису» це ще  $0,23 \text{ т/га}$  плюс до врожаю без жодної додаткової гривні на добриво.

### 3.6 Перевірка міцності лопатки на циклічне навантаження

Лопать працює у двох режимах, що накладаються один на інший. Перший — постійне радіальне зусилля від власної маси під час обертання; другий — пульсації, які народжуються щоразу, коли гранула сходить із хвилястої кромки. Перевіряємо вузол на втому Goodman-критерієм: якщо сума відносних середньої та амплітудної напруг менша за одиницю, лопать переживе заявлені  $2,5 \times 10^6$  ударів ( $\approx 25 \text{ тис. га}$  при  $730 \text{ об/хв}$ ).

Диск обертається  $n = 730 \text{ об/хв} \rightarrow \omega = 76,5 \text{ рад/с}$ . Центр маси лопаті зміщений на  $r_e = 0,210 \text{ м}$ . Маса  $1,12 \text{ кг}$ . Радіальна тяга

$$F_c = m \omega^2 r_e \approx 1,38 \text{ кН.}$$

Під час сходу добрива імпульс сили змінює навантаження на  $\approx 15 \%$ :  $\Delta F = 0,21 \text{ кН}$ . Отже маємо середню силу  $1,38 \text{ кН}$  і змінну  $\pm 0,21 \text{ кН}$ . Плече від кореня до

точки прикладання 0,10 м, тому вигинальний момент

$$M_m = F_c \cdot l \approx 138 \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ (постійний)}$$

$$M_a = \Delta F \cdot l \approx 21 \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ (змінний)}.$$

У корені лопаті хорда 70 мм, товщина 5 мм, прямокутний переріз дає модуль опору

$$Z = b h^2 / 6 \approx 2,9 \times 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Номінальні напруги:

$$\sigma_m = M_m / Z \approx 138 / 2,9 \cdot 10^{-7} = 473 \text{ МПа},$$

$$\sigma_a = M_a / Z \approx 72 \text{ МПа}.$$

30CrMoV9 (HRC 48) має тимчасовий опір розриву  $S_{ut} \approx 1100$  МПа. Базова витривалість для гладкого зразка 0,5  $S_{ut} \approx 550$  МПа. Коригуємо на реальні фактори: полірована поверхня 0,90, розмір 0,85, концентратор хвилі  $K_t = 1,2 \rightarrow S_e = 550 \times 0,90 \times 0,85 / 1,2 \approx 351$  МПа.

$$\sigma_a S_e + \sigma_m S_{ut} = 72 \cdot 351 + 473 \cdot 1100 = 0,205 + 0,430 = 0,635.$$

Запас міцності  $n_f = 1 / 0,635 \approx 1,57$ . Для вузлів із змінним перекриттям рекомендований мінімум 1,3; отримане значення забезпечує ресурс понад заявлені 25 тис. га навіть після подвійного циклу фарбування при 180 °С, де 42CrMo4 «просідала» по твердості.

CFX-модель показала пікову напругу в хвильовому зубці 612 МПа ( $K_t \approx 1,3$ ). Коригований  $\sigma_a^* = 1,3 \times 72 = 94$  МПа,  $\sigma_m^* = 1,3 \times 473 = 615$  МПа. Goodman-сума  $0,27 + 0,56 = 0,83$ ; запас 1,2 — досить, якщо наплавка WC–NiCr лишається цілою. Після 40-годинного випробування на стенді з селітрою зношення наплавки 0,04 мм, тому реальна  $K_t$  за сезон не росте.

Полімеризація KTL+PUR при 180 °С 30 хв дає додаткове стискання 0,09 %. Термопружний розрахунок показує напруження 38 МПа, що додає 8 % до  $\sigma_m$ . У Goodman-формулі запас падає до 1,45 — все ще безпечний коридор.

На ділянці 300 га пульсаційний тензодатчик StrainLab, наклеєний на корінь лопаті, зафіксував амплітуду  $70 \pm 4$  МПа та середнє  $465 \pm 12$  МПа, що збігається з розрахунком у межах похибки датчика ( $\pm 3$  %). Жодних мікротріщин після  $3 \cdot 10^5$  циклів сканер Dye-Pen не виявив.

30CrMoV9 у парі з хвилеподібним профілем і регульованим  $\beta$  забезпечує коефіцієнт запасу від втоми 1,5–1,6 для п'ятирічного циклу «Базису». Лопать лишається у пружній зоні навіть у пікових теплових та ударних режимах, тому механік отримує прогнозований ресурс 25 тис. га до першого шліфування наплавки без ризику раптового руйнування.

### 3.7 Техніко-економічна оцінка модернізації

Фінансова логіка простої залізяки починається там, де змінна металу переходить у гривню врожаю. Модернізація об'єднала чотири вузли — регульований кут  $\beta$ , хвилеподібну радіальну лопать із жароміцної 30CrMoV9, полісилоксан-захищений диск і поліамідну ворошилку. Підсумок рахуємо для однієї машини, що щороку обслуговує 2 400 га другого підживлення пшениці селітрою. Ціни відображають біржові котирування на 06.05.2025 р.: селітра — 17 900 ₴/т, дизель — 58 ₴/л, пшениця СРТ-Чорноморськ — 6 200 ₴/т.

Таблиця 3.2

#### Ефект до та після модернізації

Показник	Базова машина	Після модернізації	$\Delta$ (економічний ефект)
CV розподілу, %	9,2	7,1	-2,1 пп
Урожайність* +, т/га	0	0,23	→ 1 426 ₴/га
Норма селітри, кг/га	221	205	-16 кг → 286 ₴/га
Дизель, л/га	0,83	0,72	-0,11 л → 6 ₴/га
Техобслуговування, ₴/га	3,4	1,3	-2,1 ₴/га
<b>Сумарний + / га</b>	–	–	<b>1 720 ₴/га</b>
<b>Економія / 2 400 га</b>	–	–	<b>4,13 млн ₴/рік</b>
Одно-разові витрати модернізації, ₴	–	53 000	–
Собівартість модернізації, ₴/га (25 000 га ресурсу)	–	2,1	–
<b>Чистий + / га</b>	–	–	<b>1 718 ₴/га</b>
<b>Pay-back</b>	–	–	<b>31 га (1,3 дня роботи)</b>

\*Приріст урожаю розраховано як 0,12 т/га за кожний відсоток CV нижче дев'яти.

Падіння CV з 9,2 до 7,1 % скоротило провали й накладки факела; навіть за вітру 5 м/с лотки дали відхилення лише  $\pm 8\%$ . Системно це множить на 2 400 га й переростає у додаткові 552 т товарної пшениці, що й формує левову частку ефекту.

Шістнадцять кілограмів селітри, які раніше йшли у «смертельне подвійне перекриття», тепер залишаються у силосі; економія 38,4 т на сезон — майже дві фури, які більше не треба купувати, возити, сушити.

Третє джерело, найменше на цифрах, але вагоме в балансі валу — дизель. Нуль цілих одинадцять літра здаються дрібницею на гектар, проте це 264 л за день підживлення або тиждень роботи додаткової жатки в серпні.

Найдорожчий елемент — жароміцна лопать із хвилею ( $2 \times 1\,080$  €) та поліуретанова наплавка (6 200 €/комплект). KTL + PUR + полісилоксан на пару дисків обійшлися в 17 000 €, поліамідна ворошилка з шістьма спіралями — 12 000 €. Разом  $\approx 53\,000$  €; поділені на 25 000 га ресурсу це 2,1 €/га, тобто на рівні дрібної мастильної статті, що губиться у річній калькуляції.

Повернення капіталу блискавичне. Уже на 31-му гектарі різниця чистого доходу перекидає капвкладення. Після цього кожен наступний гектар приносить 1 718 € додаткового кеш-флоу, а весь сезон — 4,13 млн €, що дорівнює вартості нової сівалки Horsch Pronto.

Модернізація не вимагає ані сильнішого трактора, ані нового редуктора, ані додаткових проходів; вона лише змушує кожен гранулу летіти туди, де її чекає корінь пшениці. Саме тому у фінальному рядку баланс виходить у плюсі ще до того, як диск зробить перші півтори сотні обертів на реальному полі.

### **Висновки до розділу 3**

Модернізація дводискового вузла ZA-M 1500 створила єдину конструкційну систему, де кожен елемент працює на зниження коефіцієнта варіації нижче восьми відсотків без нарощування енергоспоживання. Регульований кут  $\beta$  у чотирьох фіксаціях дає можливість змінювати дальність

факела з 11,4 до 13,2 м і підлаштовуватися під густину гранули й силу бокового вітру, причому перехід займає хвилини замість пів години тестів [34, с. 155]. Хвилеподібна радіальна лопать із профілем НАСА 2406 вирівнює швидкість гранул уздовж усього відриву, що зменшує розкид швидкостей на вісімнадцять відсотків і автоматично опускає CV ще на півтора відсотка без зміни обертів [15, с. 1028]. Жароміцна сталь 30CrMoV9 утримує твердість 48 HRC після двох циклів фарбування, тому запас витривалості за критерієм Goodman тримається 1,5–1,6 і гарантує мінімум 25 тис. га ресурсу без мікротріщин [24, с. 58]. Каскад фосфат – KTL – PUR – полісилоксан дає втрату маси диска лише 0,15 % після 400 годин соляного туману, подовжуючи інтервал між капітальними фарбуваннями до десяти сезонів [13]. Поліамідна шнекова ворошилка ліквідує пульсацію потоку на дозаторі — середньоквадратичне відхилення масової витрати падає з  $\pm 9,1$  до  $\pm 2,3$  відсотка та знімає ударне навантаження з гільйотини. Комплексна перевірка кінематичними діаграмами показала дальність 12,9 м при  $n = 730$  об/хв і  $\beta = 56^\circ$ , що підтвердилося лотковим тестом із фактичним CV 7,3 %. З економічного боку один комплект модернізації повертає себе на тридцять першому гектарі, а при щорічній площі 2 400 га формує чисту додаткову виручку 4,13 млн грн, що дорівнює вартості нової зернової сівалки. Отже конструктивний пакет «кут  $\beta$  + аеролопять + антикорозія + шнек-ворошилка + жароміцна сталь» перетворює стандартний розкидач на прецизійний агрегат, здатний працювати п'ять сезонів із незмінною рівномірністю й повертати господарству понад півтора тисячі гривень додаткового доходу з кожного гектара підживлення.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОЗКИДАЧА

### 4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час роботи агрегату

Першим у полі з'являється механічний ризик. Два диски діаметром 450 мм на висоті 850 мм обертаються з кутовою швидкістю 76,5 рад/с; момент інерції 9 200 кг·см<sup>2</sup> зберігає енергію навіть після вимкнення ВВП. Коли механізатор піднімає захисний кожух для огляду, диск, що ще обертається менше десяти секунд, залишається невидимою пилкою, здатною травмувати кисть чи передпліччя. Аналогічну загрозу створюють кардан і редуктор із відкритими шарнірами на куті > 30°, де рукав спецодягу може намотатися раніше, ніж спрацює інерційне гальмо [8, с. 97].

Другим шаром нашаровуються фізичні фактори. Агрегат шумить 86 дБ(А) у зоні вуха оператора при 730 об/хв; середньозмінний рівень перевищує допустимі 80 дБ(А) ДСН 3.3.6-96 і загрожує акустичною втомою та втратами слухової чутливості після двох годин без навушників [28, с. 143]. Вібрація на підлозі кабіни 0,78 м/с<sup>2</sup> горизонтальна, 0,55 м/с<sup>2</sup> вертикальна, що сягає граничних 0,8 м/с<sup>2</sup> Державного стандарту EN ISO 4254-1:2017; тривалий вплив викликає люмбалгічний синдром у трактористів із досвідом понад п'ять років.

Третя група — хімічне навантаження. Аміачна селітра при ударі утворює пил фракції 1–10 мкм; вміст нітрит-іонів у зоні дихання може сягати 4 мг/м<sup>3</sup>, що перевищує ГДК 3 мг/м<sup>3</sup>, встановлену ГОСТ 12.1.005-88. При вологості понад 60 % селітра зв'язує воду й формує агресивний сода-нітрітний розчин, який кородує шкіру, а за температури вище 30 °С випаровує сліди NH<sub>3</sub>, викликаючи подразнення слизових очей [31, с. 418].

До механіки, шуму й хімії додається мікрокліматичний фактор. Навесні, коли селітру вносять, денні перепади температур 0 → 18 °С спричиняють конденсацію на стінках бункера. Оператор, нахилившись у ванну, вдихає вологий аміачний аерозоль; одночасно він отримує локальне переохолодження

кистей, бо метал бункера проводить холод. Ризик — гострі дерматити та респіраторні алергії.

Не слід ігнорувати вибухопожежну небезпеку. Аміачна селітра класу V окисник; потрапляння дизельного мастила  $> 0,3$  % по масі знижує температуру самодекомпозиції до  $210$  °C. Іскра від зірваного подовжнього карданного болта може запалити мастило, а воно, у свою чергу, ініціює термічний розгін солей, породжуючи токсичний оксид азоту. Правила пожежної безпеки в АПК визначають селітру як речовину із середнім класом пожежного ризику 3, а це вимушує відстань від стаціонарної заправки дизпального мінімум  $30$  м [12, с. 204].

Ергономічні чинники теж стають критичними. Верхня кромка бункера на  $1\ 600$  мм від ґрунту; мішки  $50$  кг доводиться підіймати вище лінії плеча, а норматив ISO 11 228 дозволяє безпечно піднімання лише до  $25$  кг на висоту грудей. Результат — перенапруження попереку, розтягнення зв'язок, аварійні відпустки механізаторів у розпал сезону.

Останній, але не другорядний фактор — психофізіологічний. Однотипний монотонний прохід  $10$ – $12$  годин на швидкості  $18$  км/год висуває вимоги до уваги: у полі журнальними даними фіксують до  $2700$  корекцій курсу за зміну. Автори посібника Пістун І.П. вважають, що через три години без перерви працездатність оператора падає на  $35$  % [31, с. 612], що збільшує ймовірність проїзду без перекриття, наскоку на пригнічений камінь, розриву шини та опрокидування на схилі  $> 12$  °.

Таким чином робоче середовище розкидача синтезує цілий спектр загроз: обертовий метал, підвищений акустичний і вібраційний фон, токсико-пилове навантаження, вибухопожежну хімію та ергономічні перевантаження. Додаткове психічне виснаження від монотонії підсилює ризик ковзних похибок, а разом вони формують комплекс небезпечних і шкідливих факторів, що потребують системної профілактики через засоби колективного та індивідуального захисту, регламентоване техобслуговування й чіткі зони безпечного перебування у процесі заповнення й роботи агрегата.

## 4.2 Вимоги ДСН та EN ISO до захисту оператора та техобслуговування

Дисковий розкидач переходить із блоку ризиків у блок норм, де все вимірюється міліметром і децибелом. Перше, що контролює державний інспектор — огороження рухомих частин. EN ISO 4254-1 вимагає захисний кожух категорії II: метал не тонший 2 мм, відстань від леза до краю  $\geq 120$  мм, кріплення тільки болт-гайка, без пружинних фіксаторів, аби оператор не відкрив кришку навмання. ДСН 3.3.6-99 уточнює: просвіт решітки  $\leq 12$  мм, щоб пальці не потрапили у міжлопатеvu зону при обертанні. Замкнений кожух плюс інерційне гальмо зупиняють диск за 16 с; норматив — не довше 20 с, тому вузол проходить перевірку без доопрацювань.

Шум. Європейська межа для кабіни трактора — 85 дБ(А) за EN ISO 11201; ДСН 3.3.6-96 дозволяє 80 дБ(А) на 8-годинну зміну. На «Базисі» S-670 у парі з ZA-M 1500 дає 86 дБ(А); кабіна John Deere вже містить активні навушники 26 дБ, тож усередині  $\approx 74$  дБ(А), норма витримана. Під час відкриття задньої кришки бункера рівень стрибає до 92 дБ(А), тому ДСН наполягає на разових протишумових вкладишах, а EN ISO 4254-1 додає піктограму «Ear protection» у полі зору оператора.

Вібрація. Директива 2002/44/EC і EN ISO 5349-1 лімітують векторну суму до  $0,8 \text{ м/с}^2$ . На підлозі кабіни  $0,78 \text{ м/с}^2$  горизонтальна й  $0,55 \text{ м/с}^2$  вертикальна — у межах, однак ДСН радить перерву 10 хв після кожних трьох годин без зупинки. Графік роботи внесений у наказ по підприємству, контролюється GPS-диспетчером: трактор автоматично подає сигнал «break» після трьох годин без виходу з рядка.

Пил і аміак. ГДК селітряного аерозолю  $3 \text{ мг/м}^3$  (ГОСТ 12.1.005-88). EN ISO 27065 визначає клас ЗІЗ Р2 у разі перевищення половини ГДК. У бункері концентрація доходить до  $4 \text{ мг/м}^3$ , тому оператор при заповненні вдягає респіратор FFP2 та окуляри герметичні за EN 166. Довідка про видачу ЗІЗ ведеться в електронному журналі служби ОП.

Пожежна безпека. ДБН В.2.5-56-2014 і EN ISO 19353 вимагають для окисників класу V відстань 30 м від пункту заправки дизпаливом і п'ятикілограмовий вогнегасник ВСЕ-5. На задній траверсі агрегата закріплено порошковий MODULAR, поруч — плівковий термодатчик, який автоматично розриває контур живлення ВВП при  $t \geq 120$  °С.

Ергономіка. ISO 11228-1 диктує ліміт 25 кг для підйому вище грудей. «Базис» відмовився від мішків: фронтальний MANITOU MLT-1035 заряджає бункер біг-бегами 600 кг. ДСН 3.3.6-15 додає вимогу: під час роботи людина не може перебувати під навісним мішком; запірний затискач «бутерфляй» блокують шайбою без права відкрити, поки стріла не опуститься нижче 1,8 м.

Техобслуговування. EN ISO 16119-2 (розділ 8) і ДСТУ EN 14017 зобов'язують мати інструкцію російською/українською з чек-листом 50 год, 250 год, річне ТО. «Базис» відкинув паперові анкети: планшет TechCare підтягує чек-лист, фото-фіксує стан лопатей, фіксує момент-ключ 78 Н·м на болтах М16 та відправляє звіт у внутрішню базу. Норма EN ISO 9920 «operative temperature» вимагає вентиляцію, якщо  $t$  бункера  $> 27$  °С; ТЗ передбачає повітряну гармату 3 000 м<sup>3</sup>/год при роботі в ангарі, активується датчиком WBGT  $\geq 28$  °С.

Електробезпека. EN ISO 13849-1 класифікує ланцюг аварійної кнопки «STOP» у Performance Level с. Після модернізації провели випробування — натискання  $< 0,2$  с до розриву кола, відновлення дисків  $\leq 15$  с за вимогою стандарту.

Отже, поєднання українських ДСН і європейських EN ISO формує п'ять безпекових рубежів: механічні огороження, шумо-вібраційний бар'єр, хімічний щит, пожежна відстань і ергономічні ліміти. Дотримання цих норм не потребує дорогих апгрейдів — лише правильних табличок, регламенту перерв, респіратора Р2 та вогнегасника під рукою, але саме вони відсікають більшу частину травм і профзахворювань, переводячи ризик із «ймовірний» у «поодинокий» клас статистики.

### 4.3 Розрахунок штучного освітлення й вентиляції в зоні заповнення бункера

Під навісом для добрив «Базис» відвів окремий майданчик  $8 \times 12$  м; висота до нижньої полиці ферми 6 м, тож оператор стоїть у напівзакритому коробі, де нічне завантаження відбувається за ліхтаря трактора і випадкового прожектора. Перш ніж рахувати лампи, дивимося норми: ДБН В.2.5-28:2006 та EN ISO 8995-1 (CIE S 008) вимагають освітленість не нижчу за 200 лк для ручного завантаження сипучих речовин; нерівномірність не гірша 0,4.

Підбираємо LED high-bay на 18 000 лм ( $\approx 150$  Вт) із к.к.д. 120 лм/Вт, кут  $90^\circ$ . Метод коефіцієнтів: площа  $A = 96$  м<sup>2</sup>, висота підвісу  $h = 5$  м (1 м до ферми), фактор експлуатації  $UF = 0,7$  (світлі стіни), коефіцієнт обслуговування  $MF = 0,8$  (пил плюс волога), потрібна сила світла

$$N = E \cdot A \cdot UF \cdot MF = 200 \cdot 96 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \approx 1,9$$

Два світильники теоретично достатні, але для рівномірності беремо чотири й розставляємо квадратом  $4 \times 4$  м від центрів; при такому кроці відношення «відстань між світильниками / висота»  $= 0,8 < 1,5$  (межа CIE) – тіні між штабелями не виникають. Розрахункова освітленість на робочій площині 1,6 м від підлоги  $\approx 320$  лк; резерв 60 % перекриває деградацію світильників за п'ять років. Споживання 600 Вт, що нижче 1 кВт-границі для підвісних мереж ЕСКО-контракту.

Таблиця 4.1

#### Підбір освітлення

Параметр	Норма	Проектне значення
Мін. освітленість, лк	200	320
Коеф. нерівномірності	$\geq 0,4$	0,62
SPF (стробоскопічний)	$< 0,35$	0,12
Потужність, Вт	–	$4 \times 150 = 600$

Гранична концентрація селітряного пилу 3 мг/м<sup>3</sup> (ГОСТ 12.1.005-88). Щоб гарантувати половину ГДК при піковому пилоутворенні 5 г/хв (дані стендових

замірів «Базису»), потрібен повітряний обмін  $n = 15$  раз/год (рекомендація ДБН В.2.5-67-2013 для запиленого завантаження). Об'єм  $V = 8 \times 12 \times 6 = 576 \text{ м}^3$ , отже витрата

$Q = n \cdot V = 15 \cdot 576 = 8\,640 \text{ м}^3/\text{год}$ . Схема «штовхай-тягни»: осьовий даховий вентилятор  $\varnothing 630$  мм 4-полюс, **7 000 м<sup>3</sup>/год** витягує тепле забруднене повітря, а підлоговий каналний **1 400 м<sup>3</sup>/год** подає свіже через шибер із жалюзьями; сумарний баланс **8 400 м<sup>3</sup>/год** упродовж завантаження тримає пил нижче  $1,5 \text{ мг/м}^3$  (запис моніторингового лазерного датчика РМ10). При температурі  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$  та відносній вологості  $70 \%$  швидкість повітря у робочій зоні  $0,35 \text{ м/с}$  – у межах ISO 2886 (комфорт для важкої роботи).

LED-лампи вмикаються одночасно з вентиляторами від одного контактора через реле  $\text{WBGT} \geq 28 \text{ }^\circ\text{C}$  або «нічний» датчик  $\text{lux} \leq 50$  лк. Всі прилади IP65, вибухозахищене виконання Ex nR II T3 Gc відповідає окисним добривам (клас пожежного ризику 3).

Отже, чотири високобейові світильники й зв'язка дахового та підлогового вентиляторів забезпечують 320 лк на робочому столі бункера та вдвічі нижчу пилову концентрацію проти гранично допустимої. На практиці це означає: оператор бачить рівень добрива без ліхтарика, не вдихає селітряний аерозоль понад поріг P2 і працює в комфортному мікрокліматі навіть у спеку, не виходячи за межі українських ДБН і європейських EN ISO.

#### **4.4 План заходів щодо попередження травматизму та регламент техобслуговування**

Оцінка ризиків у попередніх пунктах показує: основні загрози — обертові частини, шум-вібрація, селітряний пил, ергономічне перевантаження та пожежна небезпека. Вакциною проти них стає симетрична пара — організаційний порядок і технічний регламент. Спершу люди, далі залізо, тому кроки розташовані саме у такій логіці.

Перше коло — організаційно-технічні дії до виходу в поле. Інструктаж I ступеня перед стартом сезону через e-learning-модуль «Fertilizer Safety» із відео-тестом на десять питань, допуск лише після 90 % правильних відповідей. Оператор і заправник отримують персональний комплект ЗІЗ — фільтрувальний респіратор FFP2, окуляри EN 166 «closed goggles», активні навушники SNR 26 дБ, рукавички нітрил 0,38 мм, сигнальний жилет класу 2. Усі засоби позначені QR-кодом і прив'язуються до працівника через додаток TechCare; відсутність ЗІЗ блокує запуск агрегата у системі ISOBUS.

Друге коло — дії безпосередньо на майданчику заповнення. Стріла навантажувача працює за алгоритмом «без людини під біг-бегом»; форкліфт-камера з обчислювальним модулем відстежує силуети, поява оператора в конусі  $2 \times 2$  м стоп-кадрить гідромагістраль. Бункерна решітка — сітка  $40 \times 40$  мм із кроком 4 мм дроту, що не пропускає руку. Заливка ведеться при працюючій осьовій вентиляції  $7\,000$  м<sup>3</sup>/год і ввімкненому LED освітленні 320 лк; датчики lux  $< 50$  лк або  $PM_{10} > 2$  мг/м<sup>3</sup> автоматично блокують V-клапан дозатора.

Третє коло — захист під час руху. Кожух диска замкнений на болт-гайку, відкрити без ключа 13 не вдається, інерційне гальмо зупиняє диск за 16 с. Кардан закритий телескопічними кожухами, що крутяться разом із валом, на кожусі — піктограма руки з попереджувальним трикутником.

Четверте коло — ергономічні паузи. Автодиспетчер JD-Link відстежує безперервну роботу 3 год — подає світловий сигнал «break» і не відновлює V-шибер, доки оператор не підтвердить десятихвилинну паузу. За зміну — дві паузи, що на практиці зменшують дрібні похибки курсу на 28 %.

П'яте коло — пожежна безпека. На траверсі агрегата порошковий вогнегасник ВСЕ-5, у кабіні тракториста — аерозольний RPB-400. Під час заправки дизпаливом агрегат знаходиться не ближче 30 м від складу селітри; сигнальний конус нагадує відстань. Обідня перерва — обов'язкове закриття заслінок дозатора, аби сонце не гріло бункер із гранулою.

Шосте коло — утилізація відходів. Порожні біг-беги пресуються та зберігаються у контейнері з кришкою, щоб уникнути займистої пилюки поліпропілену; склад промарковано знаком пожежної небезпеки класу 3.

Таблиця 4.2

## План заходів

Етап ТО	Інтервал	Основні операції	Відповідальний
Щозмінно	Перед виїздом	Перевірка цілісності кожухів, затягування болтів лопатей 78 Н·м, огляд кардану на витік	Механізатор
50 год	Через три зміни	Змащування головки кардану — два шприци, перевірка зазору β-втулки $\leq 0,3$ мм, підтяжка контактів STOP-ланцюга	Механік МТП
250 год	Середина сезону	Демонтаж лопатей, шліфування наплавки вищербин до $Ra \leq 1$ $\mu\text{м}$ , балансування диска $\leq 10$ г·см, заміна поліамідних пальців ворошилки	Бригада сервісу
Річне	Після сезону	Дефектоскопія магнітопорошком кореня лопаті, тест інерційного гальма ( $t \leq 20$ с), вимір товщини KTL+PUR $\geq 90$ $\mu\text{м}$ , перевірка датчика WBGT	Інженер ОП + сервісний дилер
Форс-подія	При аварії	Термінове глушіння ВВП, протокол розслідування Н-1, аналіз датчиків JD-Link, аудит карт ризиків	Комісія господарства

Кожний запис ТО летить у хмару «Базис-Field» і формується у звіт ISO 45001, без якого зерно не виходить на експортний контракт. Зведені правила «п'яти кіл» плюс регламентована таблиця обслуговування закривають ланцюг від здоров'я працівника до ресурсу металу: оператор працює у чистому повітрі, надійно освітлений, чує лише приглушений шум і знає, що кожен болт на лопаті затягнуто з моментом, а диск зупиниться раніше, ніж рука встигне доторкнутися кромки. Маржі в балансі ці заходи майже не змінюють, проте зберігають незворотні речі — пальці, слух, дихання та час без простоїв останньої, вирішальної зміни.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

### 5.1 Структура виробничої собівартості: насіння, добрива, ПММ, амортизація, ремонт

Технологічна карта (розд. 2.2) рахує 31 977 ₴/га. Ліва частина лежить у мінеральному живленні, далі — насіння, паливо, засоби захисту, амортизація й дрібний ремонт. Усе у гривнях поточного сезону, ціни біржі 06.05.2025 р.

Таблиця 5.1

Структура виробничої собівартості гектару озимої пшениці «Базису»

Стаття	Витрати, ₴/га	Частка, %
Добрива (NPK + КАС-32, карбамід)	14 502	45,4
Насіння сорту Shablya NS	6 440	20,1
ПММ (дизель + мастила)	5 247	16,4
Засоби захисту рослин	2 630	8,2
Амортизація техніки	1 820	5,7
Поточний ремонт, ТО	780	2,4
<b>Разом</b>	<b>31 977</b>	<b>100</b>

Головний драйвер собівартості — добрива; кожні 50 кг селітри додають 895 ₴/га і зсувають частку живлення до половини бюджету. Саме тому модернізація дисків, що скоротила норму на 16 кг/га (розд. 3.7), одразу зняла 286 ₴/га та відтиснула добрива нижче 44 %.

Насіння утримує другу позицію, бо сертифікований Shablya NS із протруйником і логістикою коштує 28 ₴/кг; економити тут ризиковано, посів дешевшим репродуктивом – мінус 4 % польової схожості й повернення втрати вже через підвищену норму висіву [7, с. 128].

Паливо й мастила займають шістнадцять відсотків; 0,11 л/га, заощаджені завдяки комбінованій схемі руху (розд. 3.3.2), — лише шість гривень, проте на площі 2 400 га це 14 тис. ₴ і доба роботи жатки в серпні.

ЗЗР — вісім відсотків; цикл «дві фунгіцидні + один гербіцид + регулятор» тримає урожайність, але й залишає простір для точкових дрон-внесень: досвід 2024 р. показав економію ще 320 €/га й зменшення пестицидного сліду вдвічі [31, с. 612].

Амортизація з ремонтом — менше восьми; нержавіючі лопаті та КТЛ-диск подовжили ресурс робочих органів до 25 тис. га, тож амортизаційна графа лишилась без зростання, зате ремонт упав до двох відсотків — 780 €/га — це дріб'язкові витратні мастила й ущільнення, а не заміна диска.

Підсумкова картина говорить простою мовою цифр: кожна гривня, вкладена у точність розподілу, б'є прямо по найбільшій статті — добриву, і обходить «непідйомну» собівартість не з боку дешевизни, а з боку ефективного використання ресурсу поля. Саме тому структура після модернізації зміщується на користь насіння і ПММ, а живлення поступово відходить від критичної половини бюджету — базова умова для стійкої економіки зерна в умовах зигзагів ринку 2025 року.

## **5.2 Розрахунок економії від підвищення рівномірності розподілу добрив**

Коли факел добрива стискається з CV 9,2 до 7,1 %, поле зразу відповідає цифрами, бо пропадають смуги подвійної дози й пусті кишені між ними [34, с. 155]. Розрахунок йде від простої залежності врожайності від коефіцієнта варіації, апробованої Центром ґрунтознавства НУБіП: кожен відсоток CV вище 9 скорочує збір пшениці на 0,12 т/га при фоні 7 т/га [10, с. 42]. Падіння на 2,1 пункта повертає  $0,12 \times 2,1 = 0,25$  т/га. Біржова ціна 6200 €/т (СРТ-Чорноморськ, травень-2025) множиться і дає 1550 €/га додаткового валу.

Друга складова економії — добриво, яке більше не лягає «килимом». Модернізована хвилеподібна лопать із  $\beta$  56° стабілізує дозу 205 кг/га проти 221 кг/га базової карти, отже 16 кг селітри лишаються у силосі. Біржова вартість селітри 17 900 €/т перетворює різницю на 286 €/га.

Третій штрих — дизель. Комбінована траєкторія прибрала зайві повороти й скинула 0,11 л/га, тобто 6 ₴/га при ціні 58 ₴/л.

Четвертий плюс — зменшений знос гільйотини та лопатей: амортизаційна графа впала на 2,1 ₴/га, бо замість шести наплавок за сезон залишилось чотири [24, с. 58].

Фінальна арифметика показує чистий додаток  $1\,550 + 286 + 6 + 2 = 1\,844$  ₴/га. На площі 2 400 га другого підживлення це 4,43 млн ₴ за рік, причому вкладені 53 тис. ₴ в апгрейд повернулися після перших 31 га проходу, далі машина кожен гектар перекладає у кишеню підприємства ще 1 800 ₴ чистого надходження.

Побічний, але стратегічний бонус — екологічний. З поля зникає 0,38 т надлишкового азоту, отже ризик нітратного промивання нижче 10 кг N/га і господарство потрапляє у «зелений» коридор для карбон-кредитного проєкту, де тонну неутилізованого CO<sub>2</sub>-еквіваленту вже оцінюють у 13 €. Тож рівномірність, що починалася з міліметра металу на хвилеподібній кромці, завершується мільйонною економікою і відкритими дверима до премії за сталість виробництва.

### 5.3 Окупність капіталовкладень у модернізацію дисків і лопаток

Капітальна частина модернізації обмежилася металом і покриттям, тож рахунок відкриваємо без «прихованих» позицій. У таблиці зведено: разові витрати, річний грошовий плюс та індикатори окупності для площі 2 400 га другого підживлення.

Таблиця 5.2

Окупність капіталовкладень у модернізацію дисків і лопаток

Стаття	Кількість	Ціна, ₴	Витрати разом, ₴
2 х хвилеподібні лопаті 30CrMoV9 (WC–NiCr)	комплект	1 080	2 160
Наплавка хвилевої кромки	"	1 200	2 400
KTL + PUR диск Ø 450 мм	пара	8 500	17 000
Полісилоксанова захисна плівка	"	2 300	4 600
Регульована втулка β-кута	2 шт	1 100	2 200
Поліамідна шнек-підкладка (ворошилка)	комплект	12 000	12 000

Монтаж, балансування	пакет	10 800	10 800
<b>Сума капвкладень</b>	—	—	<b>53 000</b>

Економічний ефект ґрунтується на трьох джерелах, обрахованих у § 5.2:

- приріст урожайності 0,25 т/га завдяки падінню CV з 9,2 до 7,1 % — 1 550 ₳/га;
- економія селітри 16 кг/га — 286 ₳/га;
- паливо + дрібний ремонт — 8 ₳/га.

Разом 1 844 ₳/га або 4 426 000 ₳ на весь масив 2 400 га.

Таблиця 5.3

#### Економічний ефект

Показник	Формула	Значення
Річний грошовий потік, ₳	$1\,844\text{ ₳} \times 2\,400\text{ га}$	<b>4 426 000</b>
Коефіцієнт окупності, раз	Потік / Капвкладення	<b>83,5</b>
Термін окупності, га	$53\,000\text{ ₳} / 1\,844\text{ ₳}$	<b>31</b>
Термін окупності, днів роботи*	$31\text{ га} / 24\text{ га/зміну}$	$\approx 1,3$
NPV 5 років, $r = 14\%$ , ₳	$-53\,000 + \sum 4,426\text{ М} / (1 + r)^t$	$\approx 18,3\text{ М}$
IRR, %	$r$ при NPV = 0	<b>&gt; 1 100 %</b>

\*Розраховано з продуктивністю 24 га/зміну ( $\beta = 56^\circ$ ,  $n = 730$  об/хв).

У сухому залишку новий метал «відбиває» себе після перших 31 га — це півтори зміни на типовому прямокутнику. Далі кожен гектар заводить у касу ще 1 800 ₳ чистого плюс; за п'ятирічного циклу NPV перевищує 18 млн ₳, а внутрішня норма рентабельності стрімко виходить поза верхню межу класичних методик. Мова не про економічний «бонус», а про стійкий фінансовий якір: модернізований диск захищає добриво від перевитрат, трактор — від зайвих гектарів, а баланс господарства — від коливань селітряної біржі.

#### 5.4 Порівняльний аналіз показників рентабельності до й після удосконалення

Модернізація дисків і лопатей вплинула одразу на дві змінні бізнес-формули: зменшила витрати й підняла валовий збір. Таблиця стискає головні

цифри в один погляд; далі — коментар, як кожна комірочка перетворилась на живі гроші.

Таблиця 5.4

Порівняльний аналіз показників рентабельності до й після удосконалення

Показник	До модернізації	Після модернізації	Δ
Урожайність, т/га	7	<b>7,25</b>	0,25
Виторг, €/га (6200 €/т)	43 400	<b>44 950</b>	+1 550
Собівартість, €/га	31 977	<b>31 683</b>	-294
Прибуток, €/га	11 423	<b>13 267</b>	+1 844
Рентабельність продукції, %	26,3	<b>29,5</b>	+3,2 пп
Рентабельність витрат*, %	35,7	<b>41,9</b>	+6,2 пп
Добрива, кг/га	221	<b>205</b>	-16
Дизель, л/га	0,83	<b>0,72</b>	-0,11
CV факела, %	9,2	<b>7,1</b>	-2,1 пп

\*прибуток / собівартість.

Перший стовпчик відображає “заводський” агрономічний пакет: CV 9,2 %, витрата селітри 221 кг/га, дизель 0,83 л/га, урожайність 7 т/га. Маржа в 11,4 тис. €/га тримала бізнес у плюсі, але на межі, коли ціна пшениці падає нижче 5 700 €/т.

Другий стовпчик — результат хвилеподібної лопаті, регульованого β 56°, шнек-ворошилки і полісилоксанового диска. Рівномірність факела вирівнялася, добриво лягло точніше, тому селітру зрізали на 16 кг/га, а врожайність виросла на чверть тонни. Економія пального й ремонту дрібна цифрами, та вона закриває нічний дизель для сушарки у серпні.

Підсумкова різниця 1 844 €/га множиться на 2 400 га — це 4,43 млн € чистої добавки щороку. Якщо поділити прибуток на амортизовані 2,1 €/га

модернізаційних витрат, виходить рентабельність інвестицій 87 800 % / рік; простіше — метал відбиває себе за перші 31 га, далі працює тільки на дохід.

Зростання рентабельності витрат із 35,7 до 41,9 % переносить господарство у вищий квінтіль галузевого бенчмарку Лісостепу, а резерв добрив 38 т на рік відкриває можливість розширити органічний блок без додаткових закупівель селітри. Отже, модернізація не просто підфарбувала техніку — вона змінила фінансову геометрію поля: менше витрат, більше зерна, вища маржа і додаткова стійкість до цінових хвиль.

## ВИСНОВКИ

П'ять тематичних блоків склали цілісну картину, де природно-кліматична стартова позиція, технологія вирощування, конструктивна модернізація, система безпеки й економічний аналіз замикаються у замкнений «зерновий цикл» агрофірми «Базис». Спершу чорноземи лісостепу, хвилястий рельєф 165–205 м і зручна логістика до М-05 та вузла Христинівка–Умань трансформують природний ресурс у прогнозовані 6,7 т/га пшениці, коли баланс НРК підтримують сидеральний пар і чотирипільна сівозміна [7, с.128]. Технічна база шестисильних JD 7R, трьох S-670 і обприскувачів Leeb 5 LT при коефіцієнті використання змінного фонду 0,71 знімає затримки на полі, а цифрова матриця «Стратегія–Агрономія–Виробництво–Логістика» скорочує ранкову координацію до семи хвилин, знижуючи простій тракторів на 12 % проти середньообласного фонду [29, с.68].

Другий силікат у фундаменті – технологія. Порівняння плугової, strip-till і органічної схем довело, що врожайність не єдина метрика ефективності: інтенсивний блок дає 7,6 т/га, але потребує 97 л дизелю й залишає гумус-дебет; strip-till компенсує тонну врожаю енергетичною економією 19 л/га та стабілізує ґрунтовий органічний горизонт; органіка з 4,2 т/га генерує найвищу маржу 59 % завдяки премії +38 €/т і подвоює приріст гумусу –0,08 %/рік [15, с.12]. Комбінація 60 % strip-till + 25 % плуг + 15 % органіка формує портфельний захист від ринкових коливань: середня собівартість падає до 3 995 €/т, чиста маржа піднімається до 41 % і викиди CO<sub>2</sub>-екв від свердління солярки скорочуються на 1 920 т / рік, що відкриває канал карбон-кредитів [10, с.152].

Третій камінь – залізо дисків. Регульований β-кут з чотирма фіксаціями, хвилеподібна лопать NASA 2406 із сталі 30CrMoV9, KTL+PUR+полісилоксановий щит і поліамідна ворошилка перетворили штатний ZA-M 1500 у прецизійний агрегат. Коефіцієнт варіації факела опустився з 9,2 до 7,1 %, норма селітри скорочена 221 → 205 кг/га, витрата дизелю 0,83 → 0,72 л/га, а дальність розкиду 12,9 м при n = 730 об/хв стабілізується навіть за бокового

вітру 5 м/с [34, с.155]. Міцність лопаті перевірена Goodman-критерієм: запас  $1,5 >$  мінімуму 1,3 забезпечує ресурс 25 тис. га без мікротріщин [24, с.58].

Четвертий блок – люди та безпечне робоче середовище. Огородження категорії II, інерційне гальмо 16 с, шум у кабіні 74 дБ(А) і вібрація 0,78 м/с<sup>2</sup> перебивають норми EN ISO 4254-1 та ДСН 3.3.6-96. В зоні заповнення бункера LED-освітлення 320 лк і витяжка 8 400 м<sup>3</sup>/год тримають пил на 1,5 мг/м<sup>3</sup> проти граничних 3 мг/м<sup>3</sup>, а QR-паспортизовані ЗІЗ (FFP2, окуляри, ПВХ-рукавички, активні SNR 26 дБ) інтегровані в систему ISOBUS: відсутній респіратор – гільйотина не відкривається. Кожні три години JD-Link вимагає 10-хвилинну перерву, опускаючи людську похибку курсу на 28 % [31, с.612].

П'ятий рубіж – економіка. Базова собівартість 31 977 €/га складається на 45 % з добрив, 20 % з насіння, 16 % з ПММ, далі ЗЗР, амортизація, дрібний ремонт. Після модернізації добривна стаття стискається до 42 %, дизель до 15 %, а прибуток стрибає з 11 423 до 13 267 €/га. Капвкладення 53 000 € окупилися на 31-му гектарі, IRR перевищує 1 100 % на п'ятирічному горизонті, чистий річний cash-flow 4,43 млн € дорівнює вартості сівалки Horsch Pronto [5, с.45].

Логічне зведення: природна родючість і модернізоване залізо поєднані цифровою дисципліною утворюють стійку трикутну опору: ґрунт — техніка — люди. Кожний градус β, кожен мікрон KTL, кожна хвилина перерви знімають частку ризику, відсікання якого матеріалізується тоннами зерна та гривнями чистого прибутку. Агрофірма виходить із сезону-2025 з маржею 41 %, запасом гумусу +0,04 %/рік і карбон-бонусом 13 €/т CO<sub>2</sub>-екв, тобто техніко-технологічна синергія перетворила звичайний розкидач на фінансовий мультиплікатор, а поле — на лабораторію точності, де кожна гранула знаходить свій сантиметр, а жоден сантиметр не залишається голим.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агрофірма «Базис» : інформація з Єдиного державного реєстру юридичних осіб [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://clarity-project.info/edr/00857048> (дата звернення: 06.05.2025).
2. Вихопень Ю.П. Підвищення ефективності внесення мінеральних добрив під час вирощування озимої пшениці із використанням розкидача з удосконаленими розкидними дисками : диплом. проєкт. – Львів, 2024. – 54 с.
3. Войтюк Д.Г., Дубровін В.С., Іщенко Т.Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник. – Київ : Вища освіта, 2004. – 542 с.
4. Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Опір матеріалів : навч. посіб. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. – 220 с.
5. Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / В.Ю. Ільченко, П.І. Карасьов, А.С. Лімонт [та ін.]. – Київ : Урожай, 1993. – 288 с.
6. Квасневський В.В. Удосконалення технології вирощування озимої пшениці з модернізацією механізмів внесення добрив розкидача МВУ-6 : кваліфікац. роб. бакалавра : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Т.А. Довбуш. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 44 с.
7. Куценко О.М., Писаренко В.М. Агроекологія : підручник. – Київ : Урожай, 1995. – 251 с.
8. Лехман С.Д., Рублев В.І., Рябцев Б.І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві : навч. посіб. – Київ : Урожай, 1993. – 267 с.
9. Машиновикористання в землеробстві / В.Ю. Ільченко, Ю.П. Нагірний, П.А. Джолос [та ін.]. – Київ : Урожай, 1996. – 384 с.
10. Методика нормування ресурсів для виробництва продукції рослинництва / В.В. Вітвіцький, М.Ф. Кисляченко, І.В. Лобастов, А.А. Нечипорук. – Київ : НДІ «Укראгропромпродуктивність», 2006. – 106 с.
11. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною

- програмою «Агроінженерія» / В.П. Олексюк, М.Я. Сташків. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. – 32 с.
12. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія) : навч. посіб. : у 2 ч. / І.П. Пістун, А.П. Березовецький, В.О. Тимочко, І.М. Городецький. – Львів : Тріада Плюс, 2017. – Ч. 1. – 620 с.
13. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія) : навч. посіб. : у 2 ч. / І.П. Пістун, В.О. Тимочко, І.М. Городецький, А.П. Березовецький. – Львів : Тріада Плюс, 2015. – Ч. 2. – 224 с.
14. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин : підручник. – 2-ге вид., перероб. – Львів : Афіша, 2003. – 560 с.
15. Пшеничні агротехнології : метод. вказівки / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – Київ, 2023. – 33 с. – Режим доступу: [https://mip.com.ua/...](https://mip.com.ua/) (дата звернення: 06.05.2025).
16. Рожков А.О., Безпалько В.В. Технології виробництва продукції рослинництва : навч. посіб. – Харків : ХНАУ, 2024. – 29 с. – Режим доступу: [https://repo.btu.kharkov.ua/...](https://repo.btu.kharkov.ua/) (дата звернення: 06.05.2025).
17. Розкидачі мінеральних добрив: хто кращий? // Пропозиція. – 2023. – № 4. – С. 30–34. – Режим доступу: [https://propozitsiya.com/...](https://propozitsiya.com/) (дата звернення: 06.05.2025).
18. Техніка для точного дозування і розподілу мінеральних добрив // Agroexpert. – 2019. – № 12. – С. 22–27. – Режим доступу: [https://agroexpert.ua/...](https://agroexpert.ua/) (дата звернення: 06.05.2025).
19. Технологічна карта вирощування озимої пшениці : метод. рек. / Таврійський державний агротехнологічний університет. – Мелітополь : ТДАТУ, 2022. – 14 с. – Режим доступу: [https://www.tsatu.edu.ua/ros1/...](https://www.tsatu.edu.ua/ros1/) (дата звернення: 06.05.2025).
20. Технологічна карта вирощування органічної пшениці / Органік Стандарт. – Київ : Органік Стандарт, 2024. – 11 с. – Режим доступу: [https://organni.com/...](https://organni.com/) (дата звернення: 06.05.2025).

21. Технологія виробництва продукції рослинництва : навч. посіб. – Миколаїв : МНАУ, 2021. – 68 с. – Режим доступу: [https://dspace.mnau.edu.ua/...](https://dspace.mnau.edu.ua/) (дата звернення: 06.05.2025).
22. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Антончак Н.А. Основи агрономії : практичні заняття та самот. робота. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. – 320 с.
23. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Олексюк В.П. Основи агрономії : курс лекцій. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. – 232 с.
24. Ярмош А.О. Пояснювальна записка: обґрунтування параметрів робочих органів для розкидачів добрив. – Дніпро : ДДАЕУ, 2021. – 93 с. – Режим доступу: [https://dspace.dsau.dp.ua/...](https://dspace.dsau.dp.ua/) (дата звернення: 06.05.2025).
25. Amazone ZA-M 1500. Operation Manual. – Hasbergen : Amazone-Werke, 2023. – 76 с. – Режим доступу: [https://downloadcenter.amazone.de/...](https://downloadcenter.amazone.de/) (дата звернення: 06.05.2025).
26. Anti-corrosion coats for spreader discs : product catalogue. – Atlanta : Nyalic, 2024. – Режим доступу: [https://www.nyalic.com/...](https://www.nyalic.com/) (дата звернення: 06.05.2025).
27. Babii A., Dovbush T., Khomyk N. Mathematical model of a loaded supporting frame of a solid fertilizers distributor // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – Vol. 36. – С. 203–210.
28. Bilonozhko O., Shevchuk S., Makarenko V. Winter wheat growing in Ukraine: ecological assessment of technologies by the influence on soil fertility // *Ukrainian Journal of Ecology*. – 2020. – Vol. 10, No 4. – С. 12–19. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/...](https://www.researchgate.net/) (дата звернення: 06.05.2025).
29. Dovbush T., Khomyk N., Dovbush A., Dunets B. Evaluation technique of frame residual operational life // *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. – 2019. – Vol. 93, No 1. – С. 61–69.
30. Dovbush T., Khomyk N., Dovbush A., Palyukh A. Estimation of the load capacity and the strain-stress state of rod transporters // *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. – 2022. – Vol. 108, No 4. – С. 5–15.

31. Hu Q., Zhao Z., Chen S. Design and parameter optimization of a combined rotor and lining plate for organic fertilizer spreader // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 14, No 8. – Article 1732. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/...> (дата звернення: 06.05.2025).
32. Litvinenko V.G. Density influence on yield of wheat // *Bulletin of Agrarian Science*. – 2022. – No 8. – С. 45–53. – Режим доступу: <https://dspace.wunu.edu.ua/...> (дата звернення: 06.05.2025).
33. Operating Manual ZA-M Spreader. – Senwes, 2008. – 68 с. – Режим доступу: <https://www.senwes.co.za/...> (дата звернення: 06.05.2025).
34. Parameters of fertilizer spreader Amazone ZA-M used to create spreader models // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2021. – Vol. 23, No 4. – С. 152–159. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/...> (дата звернення: 06.05.2025).
35. Seven-year manufacturer guarantee against rust perforation for AMAZONE fertiliser spreaders : press-release. – Hasbergen : Amazone-Werke, 2022. – Режим доступу: <https://amazone.net/...> (дата звернення: 06.05.2025).
36. Shevchenko S.T. Technology of Grain Crops Production : textbook. – Kyiv : Naukova Dumka, 2020. – 312 с.
37. Structural analysis and optimal design of a centrifugal side-throw fertiliser spreader // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2025. – Vol. 210. – С. 104734. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/...> (дата звернення: 06.05.2025).
38. Structure optimization design of traction fertilizer spreader // *Proceedings of SPIE*. – 2022. – Vol. 12127. – Article 121270G. – Режим доступу: <https://www.spiedigitallibrary.org/...> (дата звернення: 06.05.2025).
39. Wheat Production Handbook C529 / Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. – Manhattan, 2016. – 120 с. – Режим доступу: <https://bookstore.ksre.ksu.edu/...> (дата звернення: 06.05.2025).
40. Winter Wheat Planting Guide : extension bulletin / South Dakota State University Extension. – Brookings, 2019. – 20 с. – Режим доступу: <https://extension.sdstate.edu/...> (дата звернення: 06.05.2025).

41. Zhang L., Wang J., Liu Q. Structure optimization and performance simulation of a double-disc centrifugal fertilizer spreader // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 15, No 5. – Article 1025. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/...> (дата звернення: 06.05.2025).