

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
Чисельне моделювання роторної косарки для заготівлі стеблових кормів

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-2-24
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Колеснік Роман Анатолійович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Освітній ступінь: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Колесніку Роману Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання роторної косарки для заготівлі стеблових кормів

керівник роботи: Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом вищого навчального закладу від

«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 05.12.2025 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації сільського господарства та існуючих технічних засобів для скошування трав. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу роботи косарки. 3. Методика чисельного моделювання. 4. Результати чисельного моделювання. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність удосконаленої косарки. Висновки. Список використаних джерел.

Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (2 аркуша, А4). 3. Аналітичні дослідження (1 аркушів, А4). 4 Чисельне моделювання (2 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Лупко К. О., старший викладач	24.10.2025	05.12.2025
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	05.10.2025	05.12.2025

7. Дата видачі завдання: 24 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 05.11.2025 р	виконано
2	Теоретичний	до 14.11.2025 р	виконано
3	Чисельний експеримент	до 26.11.2025 р	виконано
4	Охорона праці	до 28.11.2025 р	виконано
5	Економічний	до 01.12.2025 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 05.12.2025 р	виконано

Студент

_____ Колеснік Р.А. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Лупко К. О. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Колеснік Р.А. Чисельне моделювання роторної косарки для заготівлі стеблових кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі розглянуто актуальну проблему удосконалення процесів скошування трав для заготівлі стеблових кормів, що мають вирішальне значення у формуванні кормової бази тваринництва України. Проведено аналіз сучасного стану кормовиробництва в країні, визначено основні тенденції та проблеми, пов'язані з якістю та обсягами кормів. Окрему увагу приділено технологіям заготівлі сіна, сінажу та силосу, а також оцінці технічних засобів, що використовуються для скошування трав, їхнім перевагам та недолікам. У роботі виконано аналітичні дослідження процесу роботи косарки: визначено сили різання стебел, встановлено взаємозв'язок між швидкістю руху машини та рівномірністю зрізу, розраховано продуктивність обладнання. Для уточнення характеристик процесу застосовано чисельне моделювання: побудовано 3D-модель, сформовано обчислювальну сітку, обрано фізичні моделі взаємодії ножа з рослинною масою та проведено візуалізацію динаміки зрізу стебел. Результати моделювання дали змогу оцінити вплив конструктивних і режимних параметрів косарки на якість зрізу та ефективність роботи. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо удосконалення конструкції косарки з метою підвищення продуктивності та зниження енергетичних витрат. У роботі також висвітлено питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях під час експлуатації косарок, а також виконано розрахунок економічної ефективності запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: стеблові корми, скошування трав, косарка, рівномірність зрізу, сила різання, продуктивність косарки, чисельне моделювання, ефективність.

Апробація. Колеснік Р.А. (2025). Методика чисельного моделювання роторної косарки для заготівлі стеблових кормів. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 226–229.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Аналіз кормової бази в Україні	9
1.2 Технологія заготівлі стеблових кормів	11
1.3 Аналіз технічних засобів для скошування трав	17
1.4 Висновки з розділу	21
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КОСАРКИ.....	23
2.1 Постановка задачі аналітичних досліджень	23
2.2 Визначення сили різання стебела трави	24
2.3 Взаємозв'язок між швидкістю руху косарки та рівномірністю зрізу стебла.....	29
2.4 Розрахунок продуктивності косарки.....	34
2.5 Висновки з розділу.....	39
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	41
3.1 Постановка задачі моделювання	41
3.2 Побудова 3D моделі і сітки	42
3.3 Вибір фізичних моделей	44
3.4 Визначення параметрів стебел трави	46
3.5 Задавання обертання ножа косарки	47
3.6 Задавання взаємодії стебел трави.....	48
3.7 Візуалізація рухомих стебел трави	49
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	51
4.1 Представлення результатів моделювання	51
4.2 Обробка результатів моделювання	54
4.3 Висновки з розділу.....	63
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОСАРКИ	68
ВИСНОВКИ	70
Бібліографія.....	72
Додатки	76

ВСТУП

Сучасне сільськогосподарське виробництво потребує високопродуктивної та надійної техніки для заготівлі кормів, яка забезпечує мінімальні втрати біомаси та високу якість скошеної маси. Одним із найбільш поширених знарядь для збирання стеблових культур є роторні косарки, що характеризуються простотою конструкції, високою швидкістю роботи та здатністю ефективно скошувати травостій різної щільності й висоти. Проте у процесі їх експлуатації виникає низка проблем, пов'язаних з оптимізацією конструктивних і кінематичних параметрів, підвищенням енергетичної ефективності та зменшенням навантажень на робочі органи.

Традиційні методи експериментальних досліджень конструкцій сільськогосподарських машин вимагають значних матеріальних і часових витрат. Тому одним із перспективних підходів до вдосконалення роторних косарок є використання чисельного моделювання, яке дозволяє відтворити процес роботи машини у віртуальному середовищі, провести аналіз динаміки руху робочих органів, взаємодії ножів зі стеблами рослин та розподілу навантажень у конструкції. Застосування сучасних програмних комплексів для інженерного аналізу, зокрема методів кінцевих елементів (МКЕ) та обчислювальної гідродинаміки (CFD), відкриває можливості для глибокого дослідження процесів різання і транспортування зеленої маси.

Таким чином, чисельне моделювання роторних косарок є важливим етапом науково-технічного обґрунтування нових конструктивно-технологічних рішень, що сприятиме підвищенню їх продуктивності, довговічності та економічної ефективності у процесі заготівлі стеблових кормів.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи роторної косарки шляхом створення чисельної моделі процесу її функціонування, яка дозволить дослідити взаємодію ножів з рослинною масою, оцінити навантаження на конструктивні елементи, визначити вплив кінематичних і технологічних параметрів на якість зрізу та енергоспоживання, а також обґрунтувати раціональні

параметри машини для забезпечення надійної та економічної заготівлі стеблових кормів.

Завдання дослідження:

– провести огляд сучасного стану науково-технічних розробок у сфері конструкцій роторних косарок, проаналізувати основні напрями їх удосконалення та визначити актуальні проблеми, які потребують вирішення;

– виконати аналітичний аналіз кінематичних і динамічних параметрів роторної косарки, визначити залежності, що характеризують взаємодію ножів із стебловою масою, та обґрунтувати фактори, які найбільш суттєво впливають на якість зрізу й енергоспоживання.

– розробити методику чисельного моделювання процесу роботи роторної косарки з використанням сучасних програмних комплексів, визначити граничні умови, параметри матеріалів та критерії оцінювання ефективності.

– провести серію чисельних експериментів для аналізу напружено-деформованого стану робочих органів, оцінки сил різання та навантажень, дослідити вплив конструктивно-технологічних параметрів на якість зрізу й енергетичні показники роботи косарки.

– розробити рекомендації щодо забезпечення безпечних умов експлуатації роторних косарок, оцінити потенційні ризики для обслуговуючого персоналу та передбачити заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях.

– виконати розрахунок економічної доцільності впровадження удосконаленої конструкції косарки, визначити показники собівартості заготівлі кормів, строк окупності та очікуваний економічний ефект від застосування нової машини у виробничих умовах.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз кормової бази в Україні

Аналіз кормової бази в Україні за період 2020–2024 років свідчить про значні зміни, зумовлені поєднанням природно-кліматичних, економічних та соціально-політичних факторів. Забезпечення галузі тваринництва якісними і достатніми обсягами кормів залишається одним із ключових завдань аграрного сектору, адже від цього залежить продуктивність великої рогатої худоби, свиней, птиці та інших видів сільськогосподарських тварин.

У 2020 році посівні площі під кормовими культурами становили близько 1,7 млн га, що дозволило отримати понад 25 млн тонн кормів. Основними культурами були силосна кукурудза, багаторічні й однорічні трави, а також зернофуражні культури. Завдяки відносно сприятливим погодним умовам та збереженню попиту з боку тваринницьких підприємств виробництво кормів відповідало внутрішнім потребам.

У 2021 році обсяги виробництва збільшилися на 6–8 %. Це було зумовлено добрими врожайми кукурудзи на зерно та силос, а також поступовим відновленням молочного скотарства і свинарства. Заготовлених кормів вистачало для забезпечення більшості господарств, а надлишки спрямовувалися на експорт або у виробництво комбікормів.

Ситуація різко змінилася у 2022 році. Через військові дії посівні площі під кормовими культурами скоротилися на 20–25 %, що призвело до зменшення валового виробництва кормів до 18 млн тонн. Дефіцит комбікормів сягнув майже третини від потреби. Це спричинило скорочення поголів'я худоби, зниження продуктивності тваринництва та зростання собівартості виробництва молока, м'яса й іншої продукції. Водночас виникли проблеми з логістикою та зберіганням кормів у зоні бойових дій.

У 2023 році спостерігалось часткове відновлення. Площі під кормовими культурами збільшилися до 1,4 млн га, а виробництво кормів досягло 20–21

млн тонн. Особливу роль відіграв розвиток вирощування кукурудзи на силос і використання соняшникового шроту як високоенергетичного та білкового компонента комбикормів. Проте, порівняно з рівнем 2020–2021 років, показники залишалися нижчими, а структура кормової бази зазнала змін — скоротилося виробництво сіна й багаторічних трав, натомість зросла частка зернових і білкових культур.

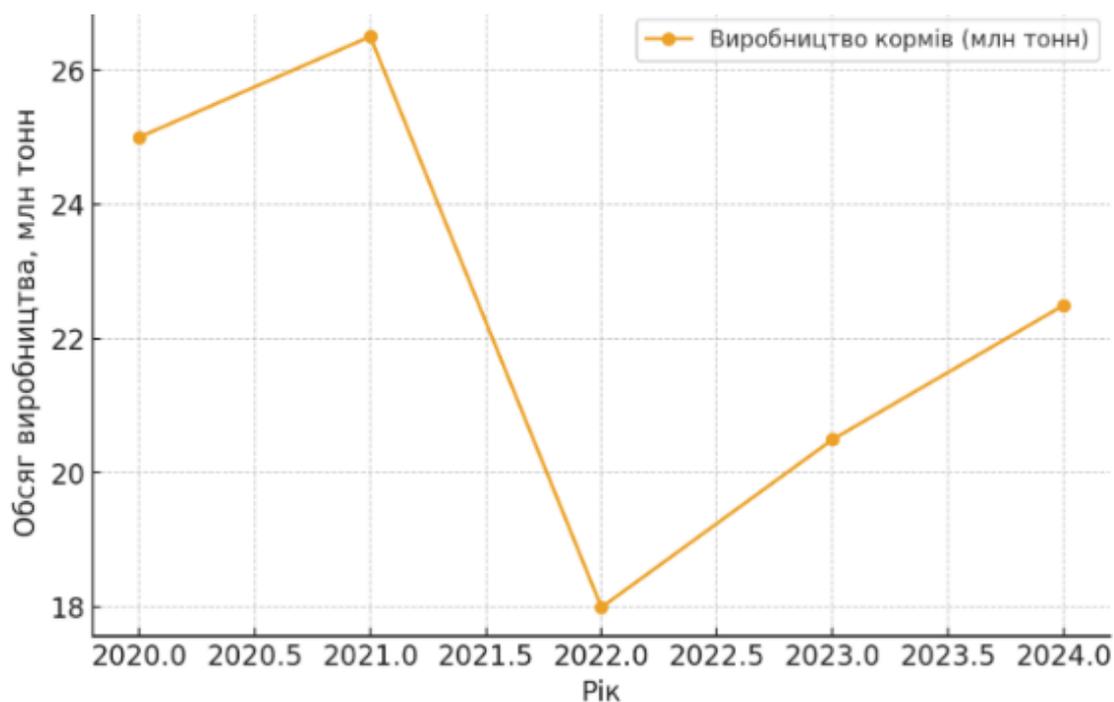


Рисунок 1.1 – Динаміка виробництва кормів в Україні (2020-2024 рр)

За попередніми статистичними даними, у 2024 році обсяги виробництва кормів досягли 22–23 млн тонн. Це свідчить про поступове відновлення та адаптацію аграрного сектору до складних умов. Певне зростання відбулося завдяки технологічному вдосконаленню процесів заготівлі силосу, активнішому використанню соєвого та соняшникового шроту, а також частковому відновленню виробництва зернофуражних культур. Водночас повністю компенсувати втрати 2022 року поки що не вдалося.

Таким чином, аналіз динаміки кормової бази України за 2020–2024 роки показує, що найскладнішим періодом був 2022 рік, коли через скорочення

посівних площ і втрати логістичної інфраструктури виник гострий дефіцит кормів. Наступні роки характеризувалися поступовим відновленням і структурними змінами у виробництві. Основним завданням на перспективу є розвиток виробництва високобілкових кормів, збалансованих за амінокислотним складом, а також удосконалення технологій заготівлі, транспортування та зберігання кормів. Це дозволить підвищити ефективність тваринницької галузі, знизити залежність від імпорتنих компонентів і створити стабільну основу для розвитку аграрного сектору України.

1.2 Технологія заготівлі стеблових кормів

Останніми роками у виробництві продукції тваринництва спостерігається тенденція до зниження його обсягів, що зумовлено низкою факторів, серед яких вагоме місце посідає незадовільний стан кормової бази. Недостатня кількість та низька якість кормів не дозволяють реалізувати генетичний потенціал тварин, який використовується лише на рівні 40–90 %. Кормові ресурси суттєво впливають і на економіку виробництва, адже їхня частка у собівартості тваринницької продукції може сягати до 70 %. Саме тому підвищення якості кормів, збереження поживних речовин у процесі заготівлі, консервування та зберігання, а також зменшення їх втрат є ключовими умовами для підвищення продуктивності тварин та ефективності галузі загалом.

Однією з головних причин зниження обсягів кормів є значний дефіцит сучасної кормозбиральної техніки в аграрних підприємствах. Наявні машини здебільшого застаріли як за конструкцією, так і за технічними характеристиками, що обмежує впровадження новітніх технологій. У результаті більшість кормів заготовлюється за традиційними методами, що супроводжуються великими втратами поживних речовин та зниженням якості кінцевого продукту.

Для нарощування обсягів виробництва кормів та підвищення їх якісних характеристик необхідне не лише використання існуючих засобів механізації, а й упровадження новітніх машин і обладнання нового покоління. Такі технічні

засоби мають забезпечувати комплексну механізацію сучасних технологічних процесів у кормовиробництві. Аналіз досвіду провідних світових компаній демонструє, що основними тенденціями розвитку техніки є зростання потужності, підвищення продуктивності, удосконалення конструкцій та створення багатофункціональних машин, здатних якісно виконувати комбіновані технологічні операції. Це дозволяє зменшити втрати врожаю, дотримуватися екологічних стандартів, покращувати умови праці та підвищувати загальну ефективність виробництва.

Останніми роками у світовому кормовиробництві поширення набувають гнучкі технології, які спрямовані на збереження максимальної кількості поживних речовин при заготівлі та зберіганні кормів. Для реалізації таких технологій створено високопродуктивні багатофункціональні машини з активними робочими органами, автоматизованими системами управління, можливістю суміщення кількох операцій та проведення процесів без перевалювання сировини. Це сприяє зменшенню втрат та підвищенню ефективності кормозаготівлі.

Ефективність тваринницького виробництва визначається низкою факторів, серед яких ключову роль відіграють: якість і збалансованість кормів, умови утримання тварин, генетичні особливості поголів'я та організація управління процесами. Перші три чинники безпосередньо впливають на продуктивність тварин, тоді як четвертий забезпечує ефективність роботи підприємства в цілому.

За даними практики, частка витрат на корми у структурі собівартості є визначальною: вона становить 40–50 % при виробництві молока та 60–90 % у вирощуванні свинини. Це свідчить, що саме процеси заготівлі, підготовки та ефективного використання кормів мають вирішальне значення для підвищення продуктивності тваринництва й формування конкурентоспроможного виробництва.

Заготівля сіна. Сіно отримують шляхом природного або штучного сушіння трав до рівня вологості 14–17 %. Для цього застосовують бобові та злакові кормові культури, їхні сумішки, а також травостій природних і покращених пасовищ.

На сьогодні у практиці сільського господарства використовують кілька основних методів заготівлі сіна:

- у вигляді розсипної маси (подрібненої або не подрібненої);
- у вигляді пресованих тюків;
- з використанням активного вентилявання для досушування як розсипного, так і пресованого сіна.

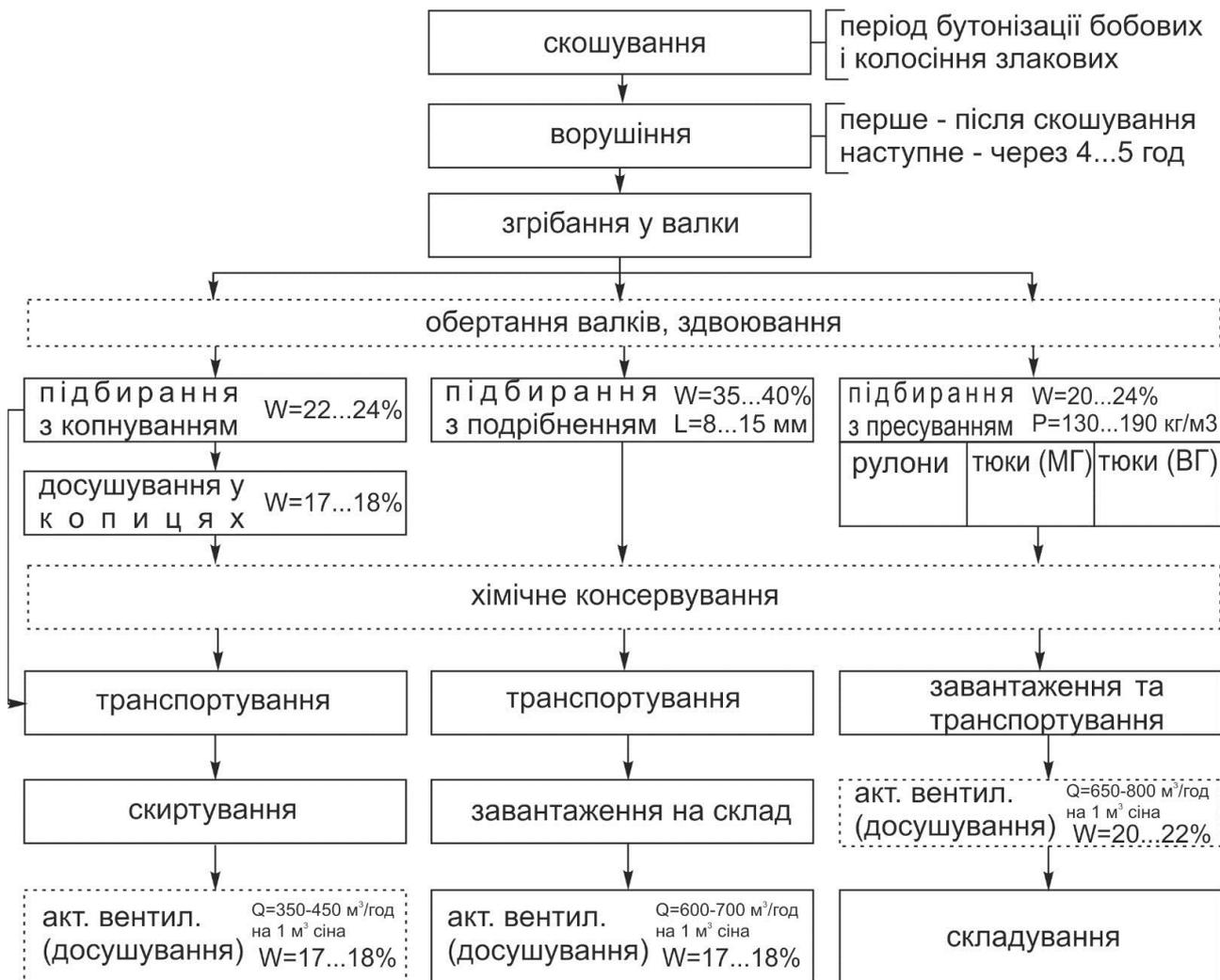


Рисунок 1.2 – Технологія заготівлі сіна

Технологія заготівлі пресованого сіна має низку суттєвих переваг. По-перше, зменшуються втрати під час збирання завдяки скороченню кількості операцій. По-друге, щільно спресована маса займає у 1,5–2 рази менше місця, ніж

розсипна, що робить її зручнішою й економічно вигіднішою для зберігання у спеціальних приміщеннях. Крім того, ця технологія забезпечує нижчі витрати праці (на 15–18 %) і палива (на 10–40 %) та створює умови для повної механізації всього процесу.

Заготівля сінажу та силосу. Заготівля сінажу включає послідовне виконання таких операцій: скошування трав (із плющенням бобових), пров'ялювання, формування валків, підбирання, подрібнення і завантаження у транспорт, перевезення до сховища, розвантаження та ретельне трамбування маси у траншеях чи буртах з подальшим надійним укриттям. При використанні сінажних башт цей процес відрізняється тим, що замість трамбування та укривання здійснюється рівномірне завантаження в башту.

Під час заготівлі масу підсушують до вологості близько 50 %, після чого закладають у траншеї шарами не менше одного метра. Якщо висота стінок не перевищує 3 м, траншею необхідно завантажити протягом трьох днів. Для якісного ущільнення орієнтиром є температура маси, яка не повинна підніматися вище 37 °С.

Після заповнення траншеї поверх сінажної маси кладуть шар свіжоскошеної трави завтовшки 25–30 см і щільно утрамбовують. Це зменшує доступ повітря всередину. Найкраще для вкривання використовувати спеціальну стабілізовану світлонепроникну плівку товщиною 0,15–0,20 мм, аналогічну до тієї, що застосовується для силосу.

Для збереження якості сінажу траншею відкривають поступово, не більше ніж на 2 м за довжиною, а корм вибирають щодня. Якщо поверхня довго залишається незачищеною, маса починає пліснявіти і нагріватися до 50–55 °С на глибину до 1,5 м. Вийнятий сінаж слід згодовувати відразу, оскільки він швидко втрачає каротин, грубіє та погіршується за поїданням тваринами.

Сучасні технології. Останнім часом у країнах з розвиненим тваринництвом активно впроваджується енергозберігаюча технологія заготівлі та зберігання сінажу у вигляді рулонів чи великогабаритних тюків, обгорнутих полімерною

плівкою. Така система дозволяє формувати заготовки безпосередньо на полі за допомогою пресів-підбирачів. На 1 м³ сінажу витрачається близько 0,8 кг плівки.

Герметично запаковані тюки або рулони можна залишати прямо на полі до моменту транспортування й складування. Біохімічні процеси відбуваються всередині кожної окремої упаковки незалежно від місця зберігання.

Сінаж. Сінажем називають корм, виготовлений із трав, пров'ялених до вологості 50–55 %. Для його заготівлі найчастіше застосовують бобові культури, зокрема конюшину та люцерну. Оптимальні строки скошування трав залежать від виду: для бобових це стадія бутонізації, а для злакових — період колосіння.

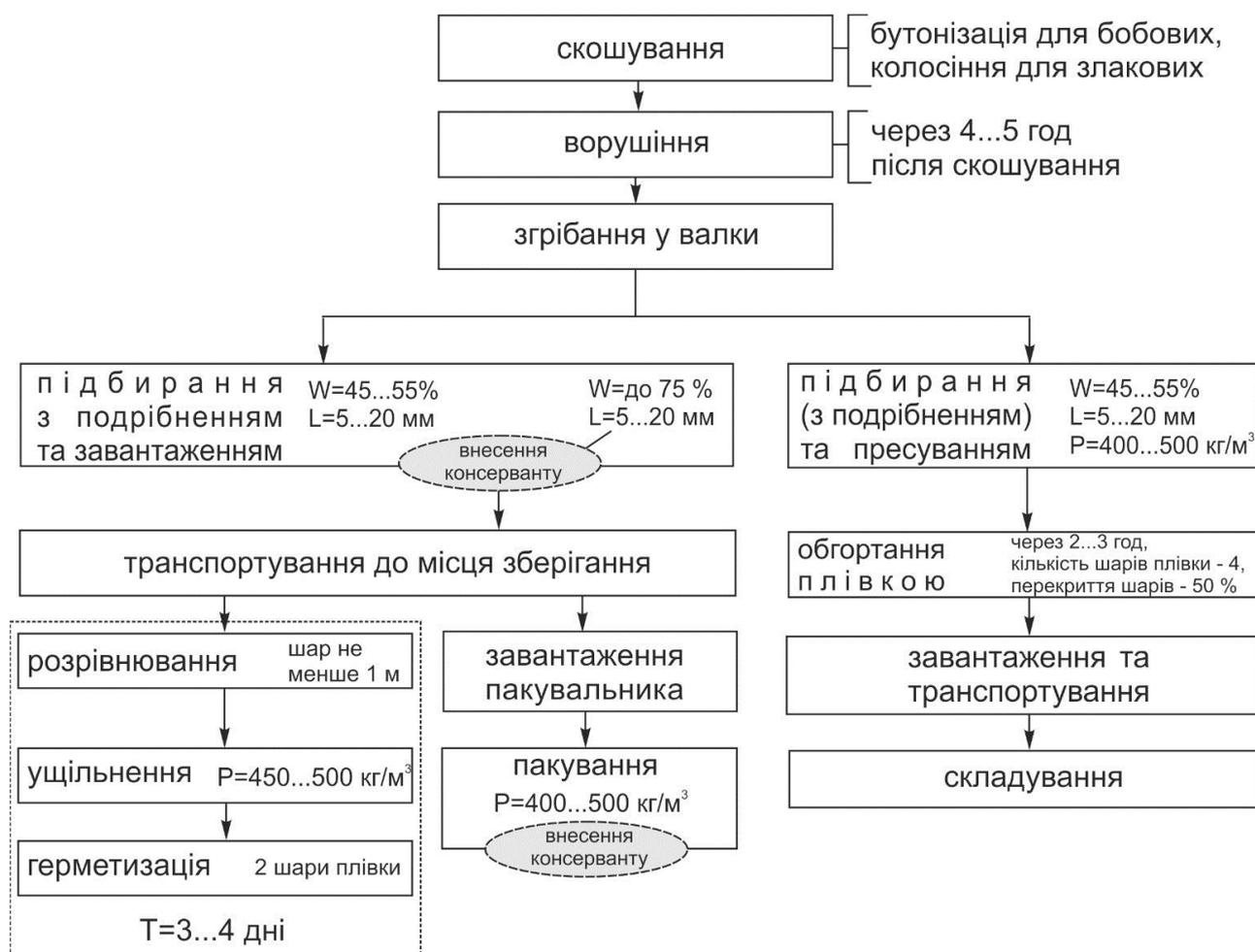


Рисунок 1.3 – Технологія заготівлі сінажу

Сьогодні поширені кілька технологій заготівлі сінажу: у буртах та курганах, у траншеях, у баштах, у рулонах чи тюках, обгорнутих плівкою, а також у

полімерних мішках (рукавах). За будь-якої технології можливе використання консервантів, що дозволяє підвищити якість корму та збільшити термін його зберігання.

Найбільш перспективною вважається технологія заготівлі сінажу в рулонах. Вона забезпечує зменшення витрат палива, спрощення процесу, відсутність потреби у спеціальних сховищах, меншу матеріалоемність та стабільно високу якість продукції з мінімальними втратами. До недоліків належать значні витрати на полімерну плівку для пакування.

Силосування. Силосування є біологічним способом консервування зеленої маси, що базується на процесах молочнокислого бродіння. В анаеробних умовах молочнокислі бактерії перетворюють цукри у молочну та оцтову кислоти. Основні технології заготівлі силосу включають використання траншей, буртів і полімерних мішків.

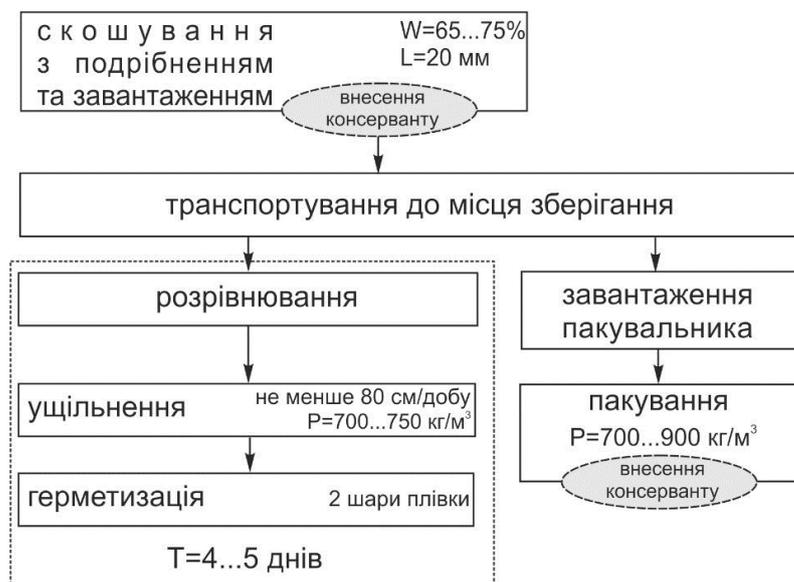


Рисунок 1.4 – Технологія заготівлі силосу

Ефективність процесу залежить від дотримання двох ключових умов: відсутності доступу повітря та достатньої кількості цукру в сировині при оптимальній вологості (не більше 70 %). Цукровий мінімум — це кількість вуглеводів, необхідна для утворення достатнього об'єму молочної кислоти, що

знижує рН маси до рівня 4,0–4,2. Така кислотність пригнічує розвиток небажаної мікрофлори та грибків, одночасно створюючи сприятливе середовище для молочнокислих бактерій.

Технологічний процес силосування передбачає послідовні операції: скошування, подрібнення, транспортування, ущільнення та герметизацію. Рослини умовно поділяють на три групи за легкістю силосування: легкосилосовані (кукурудза, соняшник, злакові трави, коренеплоди, картопля, кавуни, гарбузи, бобово-злакові суміші тощо), важкосилосовані (буркун, люцерна жовта, конюшина, лобода) та ті, що не піддаються силосуванню в чистому вигляді (кропива, бадилля огірків, дині, кабачків, картоплі, томатів).

Сховища для силосу можуть бути траншейного або баштового типів. Траншеї бувають наземними, напівзаглибленими й заглибленими, з можливістю заїзду транспорту. Для запобігання промерзанню маси стінки обваловують землею, а для збору соку облаштовують спеціальні канали. При закладанні корму щодня додають по 70–80 см ущільненої маси, що забезпечує процес так званого «холодного» силосування з температурою до 38 °С. Після заповнення сховище накривають плівкою, шаром землі або торфу. У випадку баштових силососховищ завантаження маси здійснюють пневматичними транспортерами.

1.3 Аналіз технічних засобів для скошування трав

Скошування є першим і надзвичайно важливим етапом заготівлі стеблових кормів, оскільки саме від правильного вибору строків і способу виконання цієї операції залежить подальша якість корму.

Важливість скошування у заготівлі стеблових кормів безпосередньо пов'язана з використанням сучасних технічних засобів. Своєчасне застосування відповідних технічних засобів гарантує отримання зеленої маси з оптимальною вологістю, зменшення втрат каротину, протеїну та легкокорозчинних вуглеводів. Крім того, правильно підібрані машини забезпечують зниження енергетичних витрат, раціональне використання часу та повну механізацію процесу.

Класифікація технічних засобів для скошування трав. На сучасному етапі розвитку сільськогосподарської техніки існує кілька основних типів косарок, які розрізняються конструктивними особливостями та функціональними можливостями.

Сегментно-пальцьові косарки. Це традиційні машини, що забезпечують чистий і рівний зріз трави. Їхня робота ґрунтується на принципі ножиць: рухомий ніж здійснює зворотно-поступальні рухи відносно нерухомих пальців. Перевагою таких косарок є низька енергомісткість та якість зрізу, однак їх продуктивність обмежена, а робота на вологих чи дуже густих травостоях ускладнена. У сучасному виробництві вони використовуються здебільшого у невеликих господарствах.

Ротаційні косарки. Найбільш поширені у світі завдяки високій продуктивності та здатності працювати на різних типах угідь. Їхні робочі органи обертаються з великою швидкістю, забезпечуючи швидке і якісне скошування. Ротаційні косарки бувають навісними, причіпними та фронтальними, що дозволяє адаптувати їх під різні моделі тракторів.

Дискові косарки. Відзначаються високою надійністю та довговічністю. На відміну від ротаційних, вони обладнані кількома дисками з ножами, що обертаються назустріч один одному. Це забезпечує більш рівномірне скошування навіть у складних умовах. Сучасні дискові косарки здатні працювати із захватом від 2,5 до 12 м, що робить їх придатними для великих агропідприємств.

Косарки-плющилки. Поєднують у собі функції скошування та попереднього плющення стебел. Завдяки цьому прискорюється випаровування вологи, що скорочує строки заготівлі сіна чи сінажу. Використання плющилок дозволяє зберегти більший відсоток поживних речовин у кормі, що має важливе значення для годівлі високопродуктивних тварин.

Комбіновані агрегати. Це технічні комплекси, які поєднують кілька функцій одночасно – скошування, плющення, укладання у валки. Вони дають змогу максимально механізувати процес та знизити потребу в додаткових трудових і паливно-енергетичних ресурсах.



Сегментно-пальцьові

косарки



Ротаційні косарки



Дискові косарки



Косарки-плющилки

Рисунок 1.5 – Приклади технічних засобів для скошування трав

Сучасні косарки повинні відповідати ряду вимог:

- забезпечення рівномірності зрізу на всій площі поля;
- мінімізація втрат зеленої маси під час скошування та транспортування;
- збереження поживних речовин, зокрема протеїну та каротину;
- енергетична ефективність, що дозволяє зменшити витрати пального;
- універсальність та надійність, які дають змогу працювати у різних ґрунтово-кліматичних умовах;
- можливість інтеграції в агротехнологічні комплекси для повної механізації процесу заготівлі кормів.

Останні десятиліття відзначаються суттєвим удосконаленням конструкцій косарок. Зокрема:

– застосовуються гідравлічні системи підйому і регулювання висоти зрізу, що полегшує роботу оператора;

– використовується захист ножів від ударів об каміння та тверді предмети, що підвищує довговічність техніки;

– розробляються модульні системи із можливістю одночасної роботи кількох косарок, що підвищує продуктивність у кілька разів;

– активно впроваджується цифровий моніторинг, що дозволяє контролювати швидкість обертання ножів, навантаження на двигун та інші параметри в реальному часі.

У країнах Європи та США значного поширення набули високопродуктивні косарки із захватом понад 10–12 м. Вони здатні обробляти великі площі за мінімальний проміжок часу. В Україні ж найчастіше застосовуються косарки із шириною захвату 2,1–3,5 м, що відповідає потребам середніх і малих фермерських господарств.

Ефективність застосування того чи іншого типу косарки визначається співвідношенням вартості машини, витрат пального, трудових ресурсів та обсягів виконаної роботи. Досвід українських господарств свідчить, що впровадження сучасних роторних та дискових косарок дозволяє:

- скоротити строки заготівлі кормів на 25–30%;
- зменшити витрати пального на 15–20%;
- підвищити продуктивність праці на 40–50%;
- знизити втрати поживних речовин у кормі до 10–12% (у порівнянні з 20–25% при використанні застарілих сегментних косарок).

В Україні на ринку представлені як вітчизняні, так і зарубіжні моделі косарок. Серед вітчизняних виробників – заводи «Червона зірка» (м. Кропивницький), «Лозівські машини» та інші, які випускають доступні за ціною сегментно-пальцьові та роторні косарки. Імпортна техніка, зокрема від компаній Kuhn, Krone, Claas, Pottinger, пропонує більш сучасні та багатофункціональні рішення, однак їхня висока ціна обмежує масове використання у невеликих господарствах.

Перспективним напрямом розвитку є використання енергозберігаючих косарок із комбінованими функціями, що дозволяють одночасно косити, плющити та укладати траву у валки. Це значно скорочує кількість технологічних операцій і знижує втрати корму.

1.4 Висновки з розділу

1. Аналіз кормової бази України у 2020–2024 роках показав, що галузь зазнала значних коливань під впливом кліматичних та соціально-економічних чинників, зокрема зниження виробництва у 2022 році та поступового відновлення у 2023–2024 роках. Для забезпечення стабільності та ефективності тваринництва необхідним є розширення посівів кормових культур, удосконалення технологій заготівлі й використання високобілкових компонентів, що сприятиме підвищенню продуктивності та стійкості аграрного сектору країни.

2. Аналіз сучасних технологій заготівлі стеблових кормів свідчить, що якість та ефективність кормової бази безпосередньо визначають рівень продуктивності тваринництва та його економічну результативність. Незадовільний стан кормовиробництва в Україні значною мірою пов'язаний із застарілою технікою, високими втратами поживних речовин під час заготівлі та обмеженим впровадженням сучасних технологій.

3. Скошування є першим і надзвичайно важливим етапом заготівлі стеблових кормів, оскільки саме від правильного вибору строків і способу виконання цієї операції залежить подальша якість корму. Важливість скошування у заготівлі стеблових кормів безпосередньо пов'язана з використанням сучасних технічних засобів. Своєчасне застосування відповідних технічних засобів гарантує отримання зеленої маси з оптимальною вологістю, зменшення втрат каротину, протеїну та легкокорозчинних вуглеводів. Крім того, правильно підібрані машини забезпечують зниження енергетичних витрат, раціональне використання часу та повну механізацію процесу.

4. Аналіз технічних засобів для скошування трав свідчить, що найбільш доцільним у сучасних умовах є використання ротаційних та дискових косарок, особливо з плющильними пристроями. Вони забезпечують якісний зріз, скорочують час підсихання маси, зменшують втрати поживних речовин і дозволяють оптимізувати процес заготівлі кормів. Для українських господарств важливо знайти баланс між економічною доступністю та технологічною ефективністю обраної техніки. Подальший розвиток у цій сфері буде спрямований на підвищення продуктивності машин, автоматизацію та інтеграцію цифрових технологій, що дасть змогу забезпечити стабільну кормову базу для тваринництва та підвищити конкурентоспроможність агропромислового виробництва України.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КОСАРКИ

2.1 Постановка задачі аналітичних досліджень

Аналітичні дослідження процесу роботи косарки мають на меті встановлення закономірностей взаємодії ножа зі стеблами трави, визначення впливу основних конструктивних і режимних параметрів на ефективність зрізання та енергетичні витрати. У ході таких досліджень враховується механіка різання трав'янистих рослин, кінематичні та динамічні характеристики ножового механізму, а також вплив швидкості руху косарки та фізико-механічних властивостей рослинної маси.

Завдання аналітичних досліджень полягають у наступному. По-перше, потрібно визначити залежність сили різання від частоти обертання ножа та діаметра стебел трави. Це дає змогу оцінити умови, за яких забезпечується якісний зріз при мінімальних енергетичних затратах. По-друге, важливо встановити взаємозв'язок між швидкістю руху косарки та рівномірністю зрізу, оскільки надмірна швидкість може знизити ефективність роботи ножа і призвести до неповного скошування. По-третє, необхідно розрахувати продуктивність косарки залежно від режимних параметрів, що дозволить оптимізувати роботу агрегату в реальних умовах експлуатації.

Окремим завданням є оцінка впливу діаметра стебел на долю відрізаної трави. Товстіші стебла потребують більшої енергії для зрізання, тому їхня наявність у травостой безпосередньо впливає на енергетичну ефективність процесу. Також досліджується вплив взаємодії ножа з рослинною масою на відхилення стебел під дією повітряного потоку та ударних навантажень, що може впливати на якість зрізу.

У результаті аналітичних досліджень формується база даних для подальшого чисельного моделювання процесу, що дозволяє уточнити параметри, які найбільше впливають на ефективність косарки, та визначити напрямки її удосконалення.

2.2 Визначення сили різання стебела трави

Нижче подано детальний аналітичний виклад залежності сили різання від частоти обертання ножа та діаметра стебел трави, що дає змогу кількісно оцінити умови для якісного зрізу при мінімальних енергетичних затратах. Подання містить фізичні припущення, виводи формул, інтерпретацію впливу параметрів та приклад чисельного розрахунку з поясненням результатів і обмежень моделі.

Фізична і концептуальна постановка задачі. При контакті обертового ножа з окремим стеблом трави відбувається прикладання ріжучої енергії і локальне руйнування тканин. Для виконання чистого зрізу потрібно виконати певну роботу по руйнуванню перерізу стебла; ця робота розподіляється по часу під час контакту ріжучої кромки зі стеблом. Сила різання — це миттєве зусилля, яке потрібно прикласти, щоб забезпечити потрібну потужність руйнування при даній швидкості різання. Аналіз зводиться до співвідношення «робота руйнування ↔ швидкість ножа», що дозволяє вивести формулу для сили як функції діаметра стебла і частоти обертання ножа.

Основні позначення і припущення:

- F – сила різання, Н;
- W – робота руйнування одного стебла під час зрізу, Дж;
- v – лінійна швидкість ріжучої кромки (тангенціальна швидкість ножа), м/с;
- d – діаметр стебла, м;
- σ – ефективна «границя міцності» або питомі витрати енергії руйнування матеріалу стебла, Па (Н/м²). Це може бути умовна величина, що включає не тільки міцність тканини, а й енергію на розірвання волокон, відділення тощо;
- $A = \pi d^2 / 4$ – площа поперечного перерізу стебла, м²;
- l – характерна довжина руйнування (шлях, по якому відбувається руйнування під дією ножа), м; для приблизних оцінок можна брати товщину

контакту або довжину розколювання (порядку кількох мм — декілька міліметрів до сантиметра залежно від механізму руйнування);

– D – діаметр траєкторії руху кінця ножа (або радіус ріжучої кромки), м.

– n – частота обертання ножа, s^{-1} (щоб перейти з об/хв: $n(s^{-1}) = n(\text{об/хв})/60$).

Припускається, що процес руйнування можна апроксимувати як роботу, пропорційну міцності матеріалу і площі перерізу: $W \approx \sigma A l$. Далі робота W витрачається за час контакту τ і середня потужність на одиничний стебло $P_{\text{stem}} = W/\tau$. Похідна величина – сила – пов'язана із цією потужністю через швидкість ріжучої кромки: $F \approx P_{\text{stem}}/v = W/(\nu\tau)$. Якщо τ замінити через геометричні параметри взаємодії, то отримуємо простіше співвідношення.

Кінематика ріжучої кромки. Тангенціальна швидкість ножа:

$$v = \pi D n, \quad (2.1)$$

де D – діаметр траєкторії ножа (м), а n – частота обертання в s^{-1} . Зі збільшенням n швидкість v зростає лінійно.

Робота руйнування і сила різання – базова формула. Підставивши визначення W і v у співвідношення для сили, при допущенні, що характерний час контакту пропорційний інверсії частоти (або що робота віддається за одну взаємодію), отримуємо спрощену робочу формулу:

$$F \approx \frac{\sigma A l}{v} = \frac{\sigma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l}{\pi D n} = \frac{\sigma d^2 l}{4 D n}. \quad (2.2)$$

Ця формула дає прозору інтерпретацію впливу факторів: сила різання пропорційна квадратичній величині діаметра стебла d^2 і обернено пропорційна частоті обертання n . Інші множники (σ , l , D) визначають масштаб.

Квадратична залежність від діаметра d^2 означає, що невелике збільшення товщини стебла значно підвищує силу різання і, відповідно, енергетичні витрати. Тому великі стебла (високі d) – ключовий фактор підвищених навантажень на механіку та привід.

Обернена пропорційність до n означає, що підвищення частоти обертання зменшує необхідну силу різання: за умови, що інші умови незмінні, ніж працює

«швидше», енергія подається більш концентровано і процес переходить від розриву до чистого зрізу. Практичний висновок: підвищення n полегшує зріз і знижує силу на одиницю стебла, але при цьому зростає потужність приводу (бо $P_{\text{привід}} \sim M \cdot \omega R$ та втрати на тертя), тобто потрібен компроміс.

Параметри l і σ залежать від біологічного стану рослини (сухість, фаза росту, вид культури); D – конструктивний параметр ножа (радіус обертання). Збільшення D (довша траєкторія) зменшує силу різання при тих же n (оскільки v збільшується), але практично D обмежений конструкцією машини.

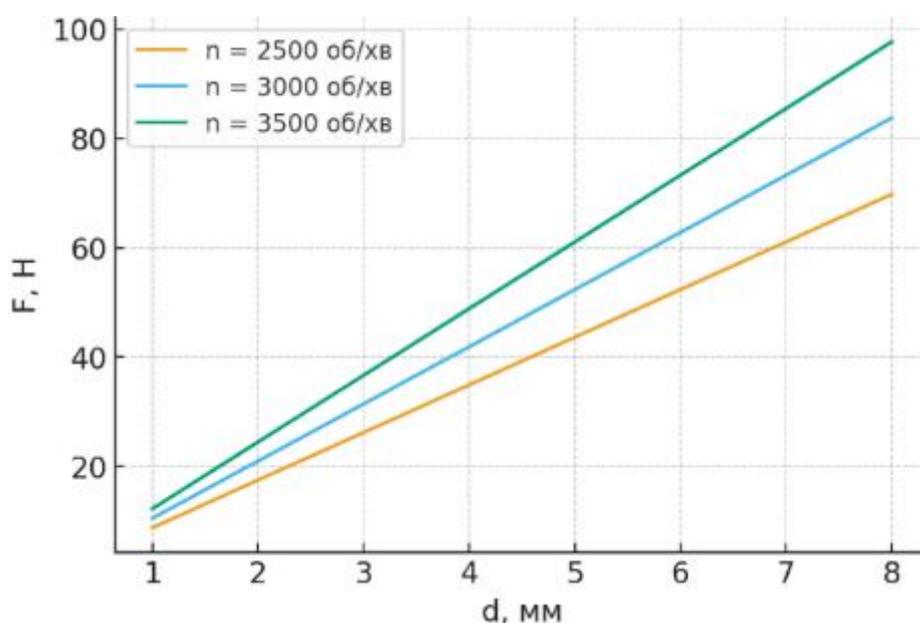


Рисунок 2.1 – Залежність сили різання F від діаметра стебла d при різних n

Енергія і потужність процесу. Потужність, що витрачається на один стебло, $P_{\text{stem}} = F \cdot v R$. Підставивши в формулу $F \cdot v R$, отримаємо:

$$P_{\text{stem}} = \frac{\sigma d^2 l}{4Dn} \cdot (\pi Dn) = \frac{\pi \sigma d^2 l}{4}. \quad (2.3)$$

Це цікаве спрощення: у наближенні, за зроблених припущень, потужність на один стебло не залежить від частоти та радіуса (вони взаємно скоригувалися), а визначається властивостями матеріалу і геометрією стебла: прямо пропорційна σ , d^2 та l . На практиці це означає, що кількість енергії на

одиницю матеріалу (на одиницю перерізу) є основним визначником загальних витрат; режими n та D змінюють розподіл сили і тривалості контакту, але не обов'язково загальну роботу на одиницю зрізаного матеріалу. Однак це суворе спрощення; реальний процес має втрати, ударні динамічні ефекти, залежності від швидкості зрізу тощо.

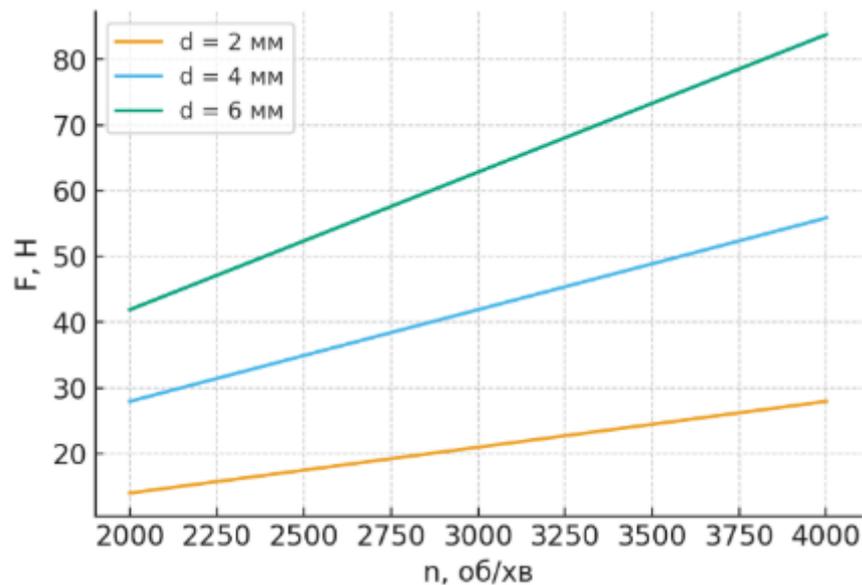


Рисунок 2.2 – Залежність сили різання F від частоти обертання n при різних d

Приклад чисельного розрахунку (ілюстративний). Візьмемо типові орієнтовні значення (приблизні, і служать лише для ілюстрації порядку величин):

- $\sigma = 5 \times 10^6$ Па (5 МПа – умовна міцність стебла),
- $d = 5d = 5$ мм = 0.005 м,
- $l = 0.01$ м (1 см характерного шляху руйнування),
- $D = 0.225D$ (радіус траєкторії для діаметра ножа ≈ 0.45 м),
- $n = 3000$ об/хв = 50 с⁻¹.

Підставляємо у формулу для сили: чисельно $d^2 = 25 \times 10^{-6}$ м², тому чисельник $\sigma d^2 l = 5 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 0.01 = 1.25$ (Н·м), знаменник $4Dn = 4 \cdot 0.225 \cdot 50 = 45$. Отже $F \approx 1.25/45 \approx 0.028$ Н.

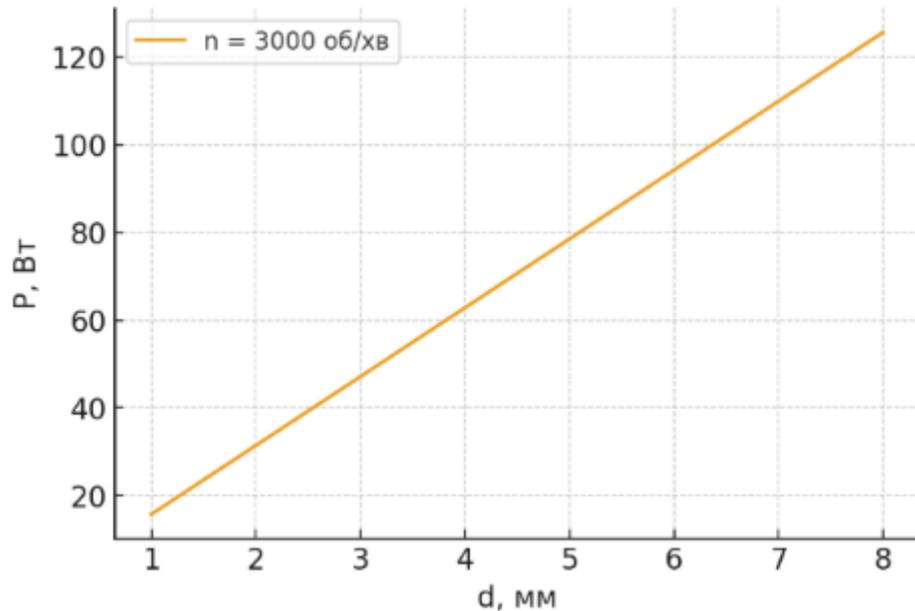


Рисунок 2.3 – Залежність потужності P від діаметра стебла d при $n = 3000$ об/хв

Тангенціальна швидкість $v = \pi D n \approx \pi \cdot 0.225 \cdot 50 \approx 3.53$ м/с. Потужність на одне стебло $P_{\text{stem}} = Fv \approx 0.028 \cdot 3.53 \approx 0.10$ Вт. Якщо щільність стебел на одиниці площі, що взаємодіють з ножом (наприклад у зоні захвату), складає 1000 шт/м² і за секунду нож проходить по певній кількості стебел (залежить від конструкції інжекції), загальні потужність і енергія на одиницю площі будуть відповідно більші (помножити на число стебел/с). Цей приклад показує, що за прийнятих припущень одиничне зусилля на стебло може бути невеликим, але сумарна потужність залежить від густоти та частоти обробки стебел.

Практичні наслідки і оптимізація:

– Для зменшення сили різання доцільно: а) зменшувати середній діаметр стебел (біологічні або агротехнічні методи), б) збільшувати частоту обертання ножа (в межах можливостей приводу), в) збільшувати діаметр траєкторії ножа (де це конструктивно можливо);

– Однак збільшення частоти n має дві протилежні дії: зменшує F на одиничне стебло, але вимагає більшої потужності приводу і може підвищити втрати через аеродинаміку та тертя; тому шукається компроміс;

– Квадратична зростаюча залежність сили від діаметра підкреслює важливість урахування структури травостою при плануванні роботи: на ділянках із товстими стеблами доцільно знижувати швидкість руху або застосовувати інші режими/інструменти.

Обмеження моделі та подальші покращення. Описана модель – спрощена. Реальний процес відрізняється: на силу впливає кут заточування ножа, еластичність стебла (відхилення), динамічні удари, контакти з кількома стеблами одночасно, локальне нагрівання/дегідратація тканин, ковзання тощо. Тому для більш точної оцінки слід: провести експериментальні вимірювання міцності σ і характерного шляху l для конкретних видів трави, додати динамічні члени (залежність від швидкості різання), урахувати нелінійну еластичність, ввести коефіцієнти втрат та ефективності приводу.

2.3 Взаємозв'язок між швидкістю руху косарки та рівномірністю зрізу стебла

Щоб встановити чіткий і практично корисний взаємозв'язок між швидкістю руху косарки та рівномірністю зрізу, необхідно розглянути кілька фізичних механізмів, що визначають, чи відбудеться чистий зріз кожного стебла, або ж стебло відхилиться / унесе / не дійде до руйнування. Далі наведено детальний аналітичний виклад із формулами, інтерпретацією та практичними висновками.

Спочатку слід *визначити ключові кінематичні величини*. Тангенціальна (лінійна) швидкість ріжучої кромки ножа на радіусі R обертового руху визначається як $v_t = 2\pi Rn$, де n – частота обертання у s^{-1} . Швидкість руху косарки позначається V . У момент контакту ріжучої кромки з окремим стеблом фактично діє відносна швидкість між ножем і стеблом; якщо напрямки опозиційні, відносна швидкість наближається до $v_{rel} \approx |v_t \pm V|$. Ця відносна швидкість визначає дві найважливіші характеристики процесу: час контакту і імпульс енергії, що передається стеблу.

Час контакту між ріжучою кромкою і точкою стебла оцінюється як $t_c \approx \ell_c/v_{rel}$, де ℓ_c – ефективна довжина контакту (типово кілька міліметрів – ширина заточки чи зона деформування). Чим менше t_c , тим коротший час дії сили на стебло; чим більше t_c , тим довше діє менш інтенсивна сила. Одночасно середня сила, що забезпечує руйнування, можна апроксимувати як відношення необхідної роботи руйнування W до шляху чи швидкості взаємодії. Для грубої оцінки прийнято використовувати вирази виду $W \approx \sigma A \ell$ (де σ – ефективна міцність матеріалу стебла, $A = \pi d^2/4$ – площа перерізу, d – діаметр стебла, ℓ – характерний шлях руйнування), і тоді середнє зусилля на проміжку контакту оцінюється порядково як $F \sim W/(v_{rel} t_c)$ або у спрощеному вигляді $F \sim W/v_{rel}$ при постулюванні, що робота відводиться за час, пропорційний інверсії швидкості. Важливий висновок із цих формул — сила, необхідна для зрізу конкретного стебла, зростає зі збільшенням площі перерізу (тобто з квадратом діаметра d^2), і зменшується при збільшенні відносної швидкості v_{rel} .

Однак на рівномірність зрізу впливає не лише порівняння середньої прикладеної енергії й міцності, а й динаміка самого стебла. Стебло має свою пружну жорсткість k_s і масу/інерцію m_s . При контактній дії ножа воно може або швидко піддатися руйнуванню, або відхилитися (зігнути) і «відскочити», уникнувши повного перерізу. Формально, якщо характерний час контакту t_c є значно меншим за власні часові масштаби деформації стебла (наприклад, $t_c \ll T_s = 2\pi \sqrt{m_s/k_s}$), стебло поводить себе жорстко і зріз відбувається більш вірогідно. Якщо ж t_c порівнянний або більше власного періоду стебла, то переважають відгинаючі переміщення і шанси на відсутність чистого зрізу зростають. Отже, ключова умова для надійного зрізу має вигляд $t_c \lesssim \alpha T_s$, де α – коефіцієнт порядку $0.2 \div 0.50$ залежно від критичної амплітуди, що призводить до відгину.

Сформулювавши ці базові співвідношення, можна окреслити кількісні критерії, що пов'язують V із рівномірністю зрізу. По-перше, існує прагматичний «порог ударної» швидкості v_{th} – мінімальна відносна швидкість, при якій ударна взаємодія ножа спричинює миттєве руйнування (у деяких

моделях і симуляціях це зазначається як умовний поріг; у практичних прикладах вказують значення порядку десятків метрів на секунду). Упевнену реалізацію зрізу можна забезпечити, коли $v_{rel} \geq v_{th}$. Оскільки $v_{rel} \approx v_t \pm V$, підвищення швидкості руху косарки зменшує модуль відносної швидкості у випадках, коли напрям руху трави/косарки і напрям додатної компоненти швидкості ножа співпадають (або частково компенсують). У практичних умовах це означає, що при великих V і невеликому v_t може не виконуватись умова $v_{rel} \geq v_{th}$, і отже утворюються «пропуски» у зрізі.

По-друге, навіть коли відносна швидкість перевищує поріг, кількість контактів ножа зі стеблом на одиницю площі або на одну рослину зменшується зі зростанням V . Для грубої оцінки можна сказати, що число взаємодій ножа з певною ділянкою травостою в одиницю часу пропорційне частоті обертання ножа n і зворотно пропорційне швидкості руху V (для фіксованої ширини захвату): кількість «ударів» по одиниці довжини дорівнює $n/(V/L)$ за відповідної геометрії, отже при збільшенні V кількість ударів на одну рослину зменшується, що підвищує ймовірність неповного зрізу або нерівномірності. Іншими словами, при фіксованому n підвищення V зменшує число повторних взаємодій, отже зростає розкид по кількості разів, коли кожне окреме стебло піддається достатньому імпульсу руйнування.

Ще один важливий параметр – імпульс, що передається під час контакту. Імпульс оцінюється як $J \approx F_{avg} t_c$. Щоб відбулася руйнація, імпульс або робота на контакті мають перевищити критичні значення J_{crit} або W_{crit} , що залежать від міцності структури стебла. Якщо за великих V t_c зменшується значно (через збільшення v_{rel} у випадку коли v_t домінує) – імпульс може зменшуватися й не досягти критичної величини, навіть якщо пікова швидкість висока. Тому оптимальний режим часто вимагає балансу між підвищенням v_{rel} (корисне для зниження необхідної постійної сили) і збереженням достатнього часу контакту для передачі імпульсу руйнування.

На практиці ці загальні співвідношення дають такі кількісні інструменти. По-перше, для фіксованого радіуса ножа R можна задати мінімальну потрібну

частоту обертання n_{\min} для заданої швидкості косарки V з умови, що $v_t - V \geq v_{th}$. Це легко розв'язується: $n_{\min} = (v_{th} + V)/2\pi Rn$. Якщо на практиці обрана частота n нижче цього значення, при даному V не гарантується чистий удар та зріз. По-друге, для оцінки рівномірності можна ввести ймовірнісну модель: ймовірність зрізу за одну взаємодію $p_{cut}(v_{rel}, d)$ – зростаюча функція від v_{rel} та спадна по d . Тоді середня кількість успішних зрізів на одну рослину при проході дорівнює $N_{hits} \cdot p_{cut}$, де N_{hits} – середня кількість ударів ножа по даному стеблу; при зростанні V N_{hits} падає і навіть за високого p_{cut} може впасти очікуване число успішних зрізів нижче одиниці, що спричинить часткове або нерівномірне скошування. Для отримання конкретних чисел потрібна калибровка p_{cut} експериментально або із чисельної моделі.

Ілюстративні числові приклади пояснюють механіку ефекту. Нехай радіус обертання ножа $R = 0.225$ м (діаметр траєкторії $\approx 0,45$ м). Для $n = 3000$ об/хв (50 s^{-1}) лінійна швидкість $v_t \approx 2\pi \cdot 0.225 \cdot 50 \approx 70.72$ м/с. Якщо поріг ударної швидкості умовно взяти $v_{th} = 20$ м/с, то навіть зі швидкістю руху $V = 2$ м/с відносна швидкість v_{rel} залишається $\approx 68,7$ м/с, тобто значно вище порогу – чистий зріз у такому випадку гарантований. Проте, якщо зменшити n до, скажімо, $800\text{--}1000$ об/хв, отримане v_t може опуститися ближче до порога, і такий самий приріст V вже буде критичним: для v_t близько $20\text{--}30$ м/с додаткова швидкість V у кілька метрів/с може зменшити v_{rel} до рівня нижче v_{th} , що і викличе неповні зрізи та нерівність. Таким чином, у реальності важливий не сам по собі величина V , а співвідношення V і v_{th} .

Інший важливий аспект – геометрія й густина травостою. При значній щільності стебел і високій швидкості руху косарки виникає ефект «накладання» і перекриття рухомих частинок: після зрізу сегменти можуть потрапляти в зону дії ножа або блокувати його, що знижує рівномірність. При надто високому V інжекторний механізм (якщо застосовується інжекція трави у модель) може не встигати формувати рівномірний потік, і це теж збільшує варіативність результату.

Переходячи до практичних рекомендацій, варто сформулювати їх так. Необхідно встановлювати частоту обертання ножа і радіус R так, щоб для найбільш імовірних діаметрів стебел d відносна швидкість v_{rel} залишалася вище умовного порога v_{th} з урахуванням максимальної робочої швидкості V . Якщо конструктивні обмеження не дозволяють збільшити n , слід знизити швидкість руху V на ділянках із товстими стеблами або на стадіях росту з підвищеною жорсткістю рослин. При виборі V також слід орієнтуватися на кількість ударів ножа по одній рослині: достатня кількість повторних взаємодій підвищує ймовірність чистого зрізу та вирівнює розподіл по висоті.

Залежність рівномірності зрізу U від швидкості руху косарки v . На рис. 2.4 видно, що при оптимальній швидкості $v \approx 2.5$ м/с забезпечується найвища рівномірність зрізу U . При зниженні чи підвищенні швидкості значення U зменшується, що свідчить про погіршення якості роботи ножа.

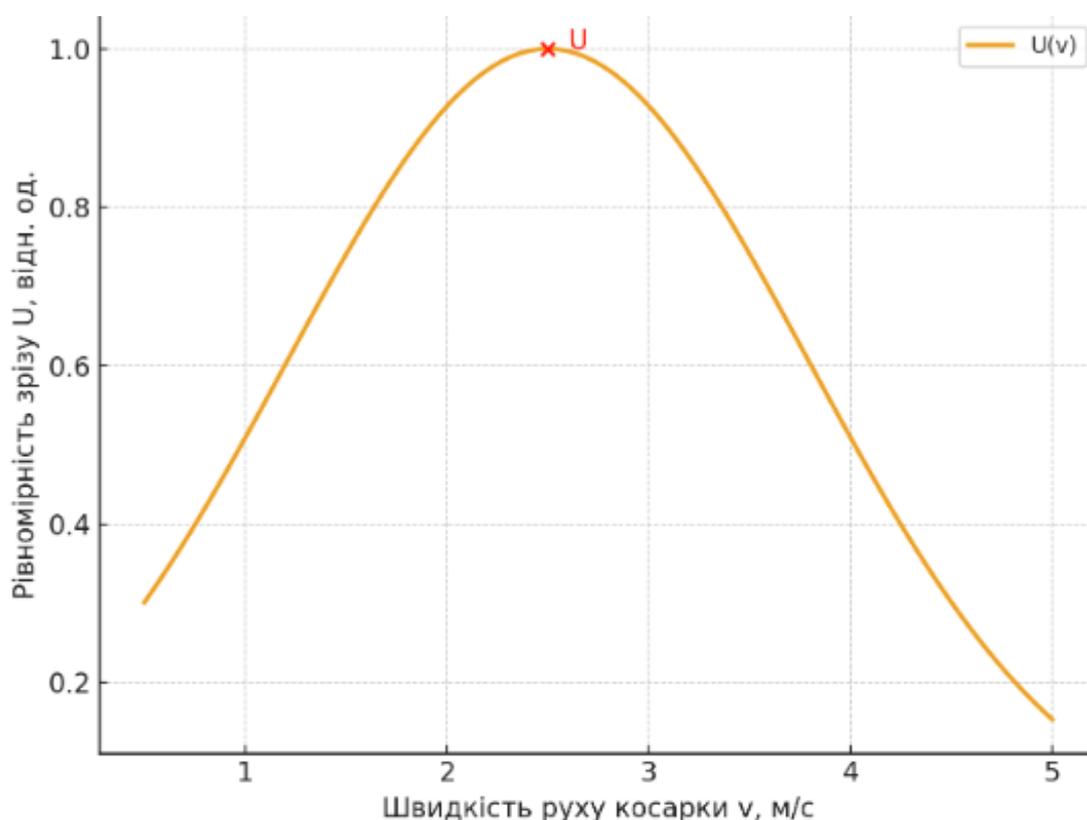


Рисунок 2.4 – Залежність рівномірності зрізу U від швидкості руху косарки v

На завершення: аналітичний ланцюжок « $v_t = 2\pi Rn \rightarrow v_{rel} \approx vt \pm V \rightarrow t_c = \ell_c/v_{rel} \rightarrow$ умова $t_c \lesssim T_{st}$ і $v_{rel} \geq v_{th}$ » дає інструмент кількісно прогнозувати, за яких режимів руху косарки і обертання ножа забезпечиться високий рівень рівномірності зрізу при мінімальних додаткових енергетичних витратах.

2.4 Розрахунок продуктивності косарки

Розрахунок продуктивності косарки як функції режимних параметрів – одна з ключових інженерних задач при оптимізації роботи агрегату в польових умовах. Далі наведено детальний аналітичний виклад, який покриває фізичні основи, необхідні формули, врахування реальних факторів (ефективна ширина захвату, повторні проходи, частка успішного зрізу), приклади підстановок та підхід до оптимізації з обмеженнями (енергія, якість зрізу).

Початкові позначення і одиниці. Нехай позначення ідентичні тим, що використовувалися раніше, і для зручності зібрані тут:

- W – номінальна ширина захвату косарки, м (робоча ширина ножа або барабана);
- V – швидкість руху косарки, м/с;
- Q — продуктивність, м²/хв (що і треба знайти);
- η_f – коефіцієнт фактичного напрацювання (field efficiency), відображає втрати часу на маневри, прискорення, зупинки (безрозмірний, наприклад 0.85–0.95);
- k – частка відрізаної трави, % або від 0 до 1 (ефективність різання з точки зору кількості рослин, що дійсно були зрізані);
- p_{cut} – імовірність успішного чистого зрізу одного стебла при одному контакті (0..1);
- N_{hits} – середня кількість контактів ножа з одним стеблом під час проходу (залежить від n і V);
- ρ_s – щільність стебел у травостої, шт/м² (якщо треба перерахувати енергію на площу або оцінити масовий потік матеріалу);

– E_{unit} – енергія на одиницю площі (або на одиницю маси) – для зв'язку з енергетичним критерієм;

– t_h – час роботи за одиницю площі (хв/м²) – зворотна продуктивності.

Базова кінематична формула продуктивності. Найпростіша (і найпоширеніша) форма продуктивності – це площа, що обробляється за одиницю часу, з урахуванням реального коефіцієнта корисної роботи:

$$Q_0 = W \cdot V \cdot 60 \quad (2.4)$$

де Q_0 має одиниці м²/хв (бо W в м, V в м/с, множимо на 60 щоб перетворити секунди в хвилини). Це ідеальна продуктивність при повному охопті без втрат і з повним зрізом. Реальна продуктивність коригується на ефективність робочого режиму та на частку фактично відрізаної трави:

$$Q = Q_0 \cdot \eta_f \cdot k = W \cdot V \cdot 60 \cdot \eta_f \cdot k \quad (2.5)$$

тут k – частка відрізаної маси/числа стебел (від 0 до 1). Якщо інтерес полягає в площі, де травостій задовольняє критерій (наприклад – «площа з чистим зрізом»), використовується саме такий множник; якщо необхідно подати продуктивність у площі, незалежній від фактичного якісного зрізу, можна опустити k .

Визначення k через режимні параметри. Щоб продуктивність залежала від режимних параметрів, потрібно пов'язати k з n , V , d та іншими величинами. У найпростішому підході:

– кількість ударів ножа по одному стеблу під час проходження:

$$N_{\text{hits}} \sim \frac{n}{V/L} \quad (2.6)$$

де L – поперечна довжина, що пов'язує число проходів (залежить від геометрії захвату); практичніше використовувати емпіричну формулу:

$$N_{\text{hits}} = \gamma \frac{n}{V} \quad (2.7)$$

де γ – коефіцієнт, що враховує геометрію ножа й ширину зони контакту (одиниця часу – відповідно одиниця безрозмірна для правильної шкали).

Імовірність зрізу одного стебла при одному ударі як функція відносної швидкості:

$$p_{\text{cut}} = f(v_{\text{rel}}, d) \quad (\text{зростає з } v_{\text{rel}}, \text{ спадає з } d) \quad (2.8)$$

Практична модель, яка використовується для калібрування:

$$p_{\text{cut}}(v_{\text{rel}}, d) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(v_{\text{rel}} - v_0) + \beta(d - d_0))} \quad (2.9)$$

де α , β , v_0 , d_0 — емпіричні параметри, що визначають чутливість до швидкості і діаметра (логістична крива між 0 і 1).

Тоді сумарна ймовірність того, що стебло буде успішно зрізане під час проходу (за N_{hits} незалежних «ударів») наближається до:

$$k_{\text{stem}} = 1 - (1 - p_{\text{cut}})^{N_{\text{hits}}}. \quad (2.10)$$

Якщо інтерес – середня частка стебел, що злетіли й відлетіли, то це $k \approx k_{\text{stem}}$. Для вбудовування в продуктивність Q :

$$Q = W V 60 \eta_f k_{\text{stem}}(n, V, d). \quad (2.11)$$

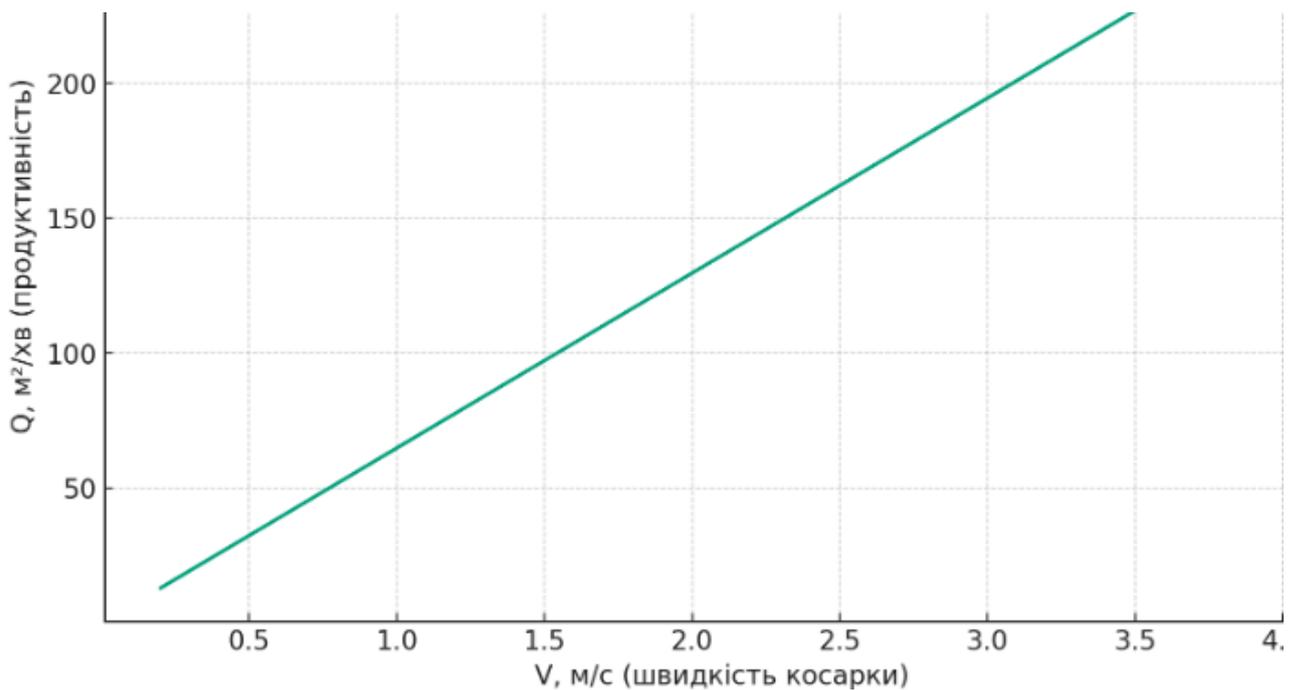


Рисунок 2.5 – Залежність продуктивності Q від швидкості руху косарки v

Усереднена аналітична апроксимація. Якщо потрібно отримати простішу явну залежність (щоб не вводити логістичні параметри), часто застосовують наближення:

$$k \approx 1 - \exp\left(-\lambda \frac{n}{V} \cdot g(d)\right), \quad (2.12)$$

де λ – емпіричний коефіцієнт, а $g(d)$ – спадна функція від діаметра (наприклад $g(d) = d_0/d$ або $g(d) = \exp(-\mu d)$). Ця форма впливає з ідеї, що при великій кількості ударів ймовірність зрізу прямує до одиниці, а при малій – залишається малою.

Підстановка в Q дає:

$$Q(V, n, d) = WV60 \eta_f \left(1 - \exp\left(-\lambda \frac{n}{V} g(d)\right)\right). \quad (2.13)$$

Це вираз наочно показує конкуренцію: знаменник V у показнику експоненти означає, що збільшення швидкості зменшує число ефективних ударів (на одиницю шляху), а тому при дуже високих V k знижується, і Q падає через зменшення частки відрізаної трави, хоча базовий множник W V росте. Отже $Q(V)$ може мати максимум при якійсь проміжній V .

Приклади простих форм $g(d)$. Деякі практично зручні варіанти для $g(d)$:

1. Обернена пропорція: $g(d) = d_0/d$. Тоді товстіші стебла роблять k меншим.
2. Експоненціальна залежність: $g(d) = \exp(-\mu d)$. Добре описує ситуацію, коли міцність тканин росте експоненційно чи логістично.
3. Квадратична: $g(d) = 1/d^2$ – якщо вплив діаметра відповідає площі перерізу.

Енергія та обмеження приводу. Оптимізація продуктивності повинна враховувати й енергетичні обмеження. Витрати енергії на одиницю площі приблизно:

$$E_{\text{area}} \approx \rho_s \cdot E_{\text{per_stem}}(n, V, d), \quad (2.14)$$

де $E_{\text{per_stem}}$ – енергія на один зріз (можна пов'язати з потужністю приводу, коефіцієнтом к.к.д. і часом контакту). Якщо відомі обмеження по доступній потужності P_{max} , необхідно забезпечити:

$$P_{\text{required}}(n, V, d) \leq P_{\text{max}}. \quad (2.15)$$

Оскільки потужність приводу приблизно пропорційна $M\omega$ і зростає з n і з навантаженням (вищі d , більші втрати), ця умова накладає обмеження на допустимі поєднання n і V . Включення енергетичного критерію у задачу оптимізації може вимагати мінімізації цільової функції виду:

$$J = w_1 (-Q) + w_2 E_{\text{area}} \quad (2.15)$$

де w_1, w_2 – ваги (нормовані), або багатокритеріальна оптимізація з обмеженням на Q і E .

Приклад чисельного сценарію (ілюстрація). Припустимо $W = 1.2$ м (широка косарка), $\eta_f = 0.9$, γ і λ підібрані з експерименту: $\lambda = 0.02$ (одиниця), $g(d) = d_0/d$ з $d_0 = 4$ мм. Розглянемо $n = 3000$ об/хв і змінну V . Підстановка у формулу дасть $Q(V)$. Побудувавши $Q(V)$, можна знайти максимум через чисельну оптимізацію. Результат зазвичай показує, що Q росте з V від нуля до певної оптимальної швидкості V^* , після чого Q падає через падіння k .

Алгоритм практичної оптимізації

1. Визначити конструктивні параметри: W , R (радіус ножа), P_{max} (потужність приводу).
2. Експериментально оцінити або взяти з літератури грубі значення: λ , $g(d)$ (залежність від діаметра), η_f , ρ_s , $\rho_{\text{cut}}(v_{\text{rel}}, d)$.
3. Побудувати функцію $Q(V, n, d)$ за формулою вище.
4. Ввести обмеження: $P_{\text{required}}(n, V, d) \leq P_{\text{max}}$, мінімальна k_{min} (якість зрізу), допустима швидкість V_{max} тощо.
5. Знайти (аналітично або чисельно) значення V і n , які максимізують Q при заданих обмеженнях або мінімізують енергоспоживання при заданому Q . Можна використовувати одновимірну оптимізацію по V при фіксованому n , або двовимірну (n, V) з методами градієнтного спуску чи перебору сітки.
6. Перевірити отримані оптимуми на стійкість: розрахувати чутливість Q до малих змін V і n (часто похідні або еластичності).

Практичні поради і спрощення:

- якщо немає детальних емпіричних даних, починати з логічної форми $k=1-\exp(-\lambda n/V)$ з підбором λ по простому експерименту (наприклад, пара проходів при різних V з виміром відсотка зрізаної трави);
- порівнювати режими не тільки по Q , а й по відношенню Q/E_{area} (продуктивність за енергію);
- включати в модель режимні обмеження: гранична швидкість V_{max} , граничний момент/потужність двигуна, допустимі рівні шуму та вібрації;
- проводити невелике поле випробувань для калібрування параметрів λ , γ , функції $g(d)$ та p_{cut} .

2.5 Висновки з розділу

1. Аналітичне співвідношення $F \sim \sigma d^2 l / (4Dn)$ дає простий і наочний інструмент для оцінки впливу діаметра стебла і частоти обертання ножа на силу різання. Воно показує, що зростання товщини стебла різко підвищує необхідне зусилля (і енергетичні витрати), тоді як підвищення частоти обертання ножа зменшує силу, сприяючи більш чистому зрізу. Для практичних рекомендацій необхідно поєднувати цей аналітичний підхід з експериментальними даними по властивостях трави та конструктивними обмеженнями косарки, аби знайти оптимальний режим роботи, який забезпечить якісний зріз при мінімальних енергетичних витратах.

2. Аналітичний ланцюжок « $v_t = 2\pi Rn \rightarrow v_{\text{rel}} \approx vt \pm V \rightarrow t_c = \ell_c / v_{\text{rel}} \rightarrow$ умова $t_c \lesssim T_{\text{st}}$ і $v_{\text{rel}} \geq v_{\text{th}}$ » дає інструмент кількісно прогнозувати, за яких режимів руху косарки і обертання ножа забезпечиться високий рівень рівномірності зрізу при мінімальних додаткових енергетичних витратах. Для практичного застосування ці формули потрібно калібрувати, визначивши експериментально або через чисельне моделювання такі параметри, як v_{th} , σ , ℓ_c , k_s і густину стебел, після чого можна скласти карти режимів (n vs V) з ізолініями імовірності зрізу і вибрати робочий діапазон, що забезпечує бажану рівномірність.

3. Аналітичний опис продуктивності Q як функції W , V , n і d дає просту формулу $Q = WV60\eta_f k(n,V,d)$, де k описує якість зрізу і залежить від числа контактів (пропорційно n/V) та від діаметра стебла. Форма $k=1-\exp(-\lambda \ln g(d)/V)$ є зручною для аналізу й демонструє наявність оптимального V (компроміс між базовим приростом W V і падінням k). Практична оптимізація вимагає включення енергетичних обмежень і емпіричної калибрування параметрів; кінцевий режим зазвичай вибирається як той, що забезпечує максимальний Q при заданому прийнятному рівні якості зрізу та обмеженнях по потужності приводу.

3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Постановка задачі моделювання

У даній роботі розглядається чисельне моделювання процесу роботи косарки для скошування трав із використанням методу дискретних елементів (DEM) та спеціалізованої моделі гнучкого волокна (Flexible Fiber model), реалізованої у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+. Такий підхід дозволяє відтворити процес взаємодії ножа косарки зі стеблами трави, оцінити якість зрізу, розподіл довжини скошених часток, а також визначити динамічні навантаження на робочі органи.

Модель гнучкого волокна широко застосовується у чисельному моделюванні різноманітних процесів, де присутні волокнисті матеріали. Її використовують у хімічній промисловості для створення армованих пластмас і цементів, під час виробництва текстилю та бавовни, у біореакторах для переробки біомаси, а також для відтворення поведінки сільськогосподарських культур. Волокно у цій моделі представляється як послідовність циліндричних сегментів, з'єднаних між собою торцями. Зв'язки між сегментами забезпечують можливість аксіального розтягу, стискання і згинальних деформацій, а за надмірних навантажень можуть руйнуватися. При цьому для точного опису поведінки волокна не потрібна велика кількість сегментів, що робить модель обчислювально ефективною.

У даній симуляції процес скошування моделюється як робота обертального ножа косарки, що взаємодіє зі стеблами трави. Ніж виконує жорстке обертання навколо осі у зі швидкістю 3625 об/хв, а травостій подається назустріч ножу зі швидкістю 2 м/с. Кожне стебло трави представлено як DEM-частинка у вигляді гнучкого волокна, що складається з 10 циліндричних сегментів завдовжки 114,3 мм і діаметром 5,08 мм.

Застосовується також модель ударного різання (Impact Cutting model), яка передбачає, що зріз стебла відбувається лише у разі, коли швидкість контакту

ножа з травою перевищує 20 м/с. У такому випадку здійснюється один повний зріз. Для врахування впливу повітряного потоку, який створює ніж під час обертання, використовуються додаткові сили – зокрема, сила аеродинамічного опору (drag force), що діє на стебла.

Результатом симуляції є оцінка якості різання травостою за допомогою аналізу розподілу довжин скошених часток (гістограма). Це дозволяє визначити ефективність процесу скошування, дослідити вплив кінематичних параметрів ножа на якість зрізу та закласти основу для подальшого вдосконалення конструкції роторних косарок з метою підвищення їх енергетичної та технологічної ефективності.

3.2 Побудова 3D моделі і сітки

Для виконання даного прикладу використовується початковий файл симуляції, який містить геометрію ножа косарки у межах обчислювальної області та попередньо визначені області з відповідними межами (рис. 3.1). У зв'язку з використанням безсіткового методу дискретних елементів (DEM), обчислювальна область включає одну тверду область для ножа косарки та частинкову область для моделювання травостою. Параметри, необхідні для налаштування симуляції, вже задані у файлі, що забезпечує швидкий початок розрахунку.

Запуск Simcenter STAR-CCM+ здійснюється у відповідності до робочого середовища. Файл симуляції відкривається через пункт меню File > Load.... У діалоговому вікні вибирається відповідний режим обробки, який може бути як послідовним, так і паралельним. Після цього вказується шлях до файлу flexibleFiber_start.sim у папці discreteElementMethod завантажених матеріалів і підтверджується його відкриття кнопками Open та OK. Для візуалізації геометрії використовується сцена Scenes > Lawnmower Scene.

Simcenter STAR-CCM+

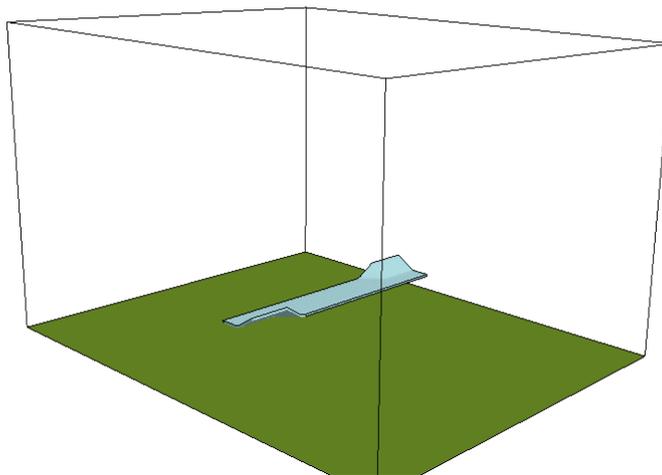


Рисунок 3.1 – 3D модель робочого органу косарки і області

Висота обчислювальної області дорівнює семикратному значенню висоти ножа, а довжина і ширина домену визначаються як 1,6 та 2 діаметри ножа відповідно, що забезпечує достатній простір для моделювання руху трави. Стебла трави представлені як гнучкі волокна у вигляді циліндричних сегментів діаметром 5,08 мм і початковою висотою 114,3 мм. Кожне стебло складається з десяти сегментів, а відстань між стеблами для інжекції дорівнює 19,05 мм. Жорсткість сегментів волокна встановлюється рівною 1 000 000 Н/м, що забезпечує реалістичну багатозафазну взаємодію. Відстань від бічних стінок домену до нижньої точки інжекції стебел дорівнює 10 % ширини домену, що запобігає контакту верхніх частин трави зі стінками. Тангенціальна швидкість ножа щодо поверхні ґрунту встановлена на рівні 2 м/с, а дані для постпроцесингу зберігаються з інтервалом 0,001 с. Крок інтегрування для неявного розв'язувача дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ с. Кількість стебел у ряду визначається як найбільше ціле число, яке дозволяє розмістити стебла з урахуванням відстані між ними та відступу від бічних стінок, а ряд нових стебел інжектується після певної кількості часових кроків, розрахованої з урахуванням швидкості руху ножа та часу інтегрування.

Після перевірки та уточнення всіх параметрів файл симуляції зберігається під новою назвою, наприклад `flexibleFiber.sim`, що дозволяє проводити подальші моделювання без зміни вихідного файлу.

3.3 Вибір фізичних моделей

Для моделювання стебел трави використовується безсітковий метод дискретних елементів (meshfree DEM), який входить до складу Лагранжевої багатофазної моделі (Lagrangian Multiphase framework).

Стебла трави представлені як гнучкі волокнисті частинки DEM у межах обчислювальної області. Вектор гравітації направлений у негативному напрямку осі y , що відповідає стандартним умовам дії земного тяжіння.

Для вибору фізичних моделей у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ створюється новий фізичний континуум.

У континуумі `Continua > Physics 1` послідовно активуються наступні моделі: часовий режим `Implicit Unsteady`, опціональна модель `Meshfree DEM`, моделі гравітації (`Gravity`), Лагранжева багатофазна модель (`Lagrangian Multiphase`), модель дискретних елементів (`Discrete Element Model (DEM)`), багатофазна взаємодія (`Multiphase Interaction`) та інтерполяція розв'язку (`Solution Interpolation`). Після активації всіх необхідних моделей діалогове вікно закривається.

Далі задається значення гравітаційного прискорення. Для цього у вузлі `Continua > Physics 1 > Reference Values > Gravity > Reference Values` встановлюється вектор гравітації $[0.0, -9.81, 0.0]$ м/с², що відповідає напрямку дії сили тяжіння вниз уздовж осі y .

Після завершення налаштування фізичних моделей та гравітаційного поля симуляція зберігається, що забезпечує готовність моделі до подальшого запуску та обчислень.

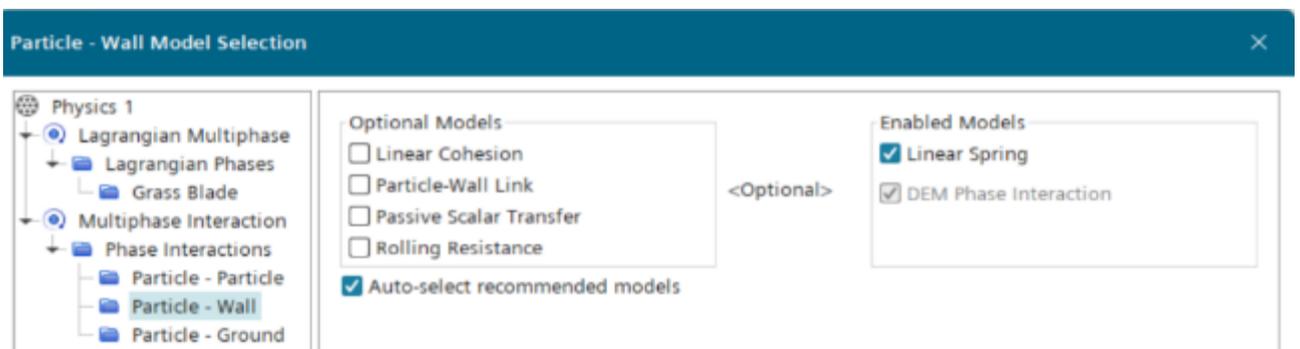
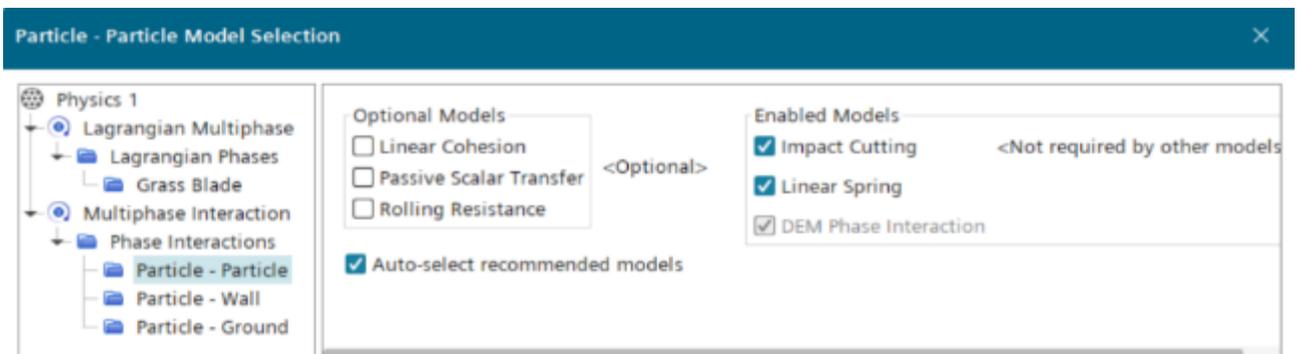
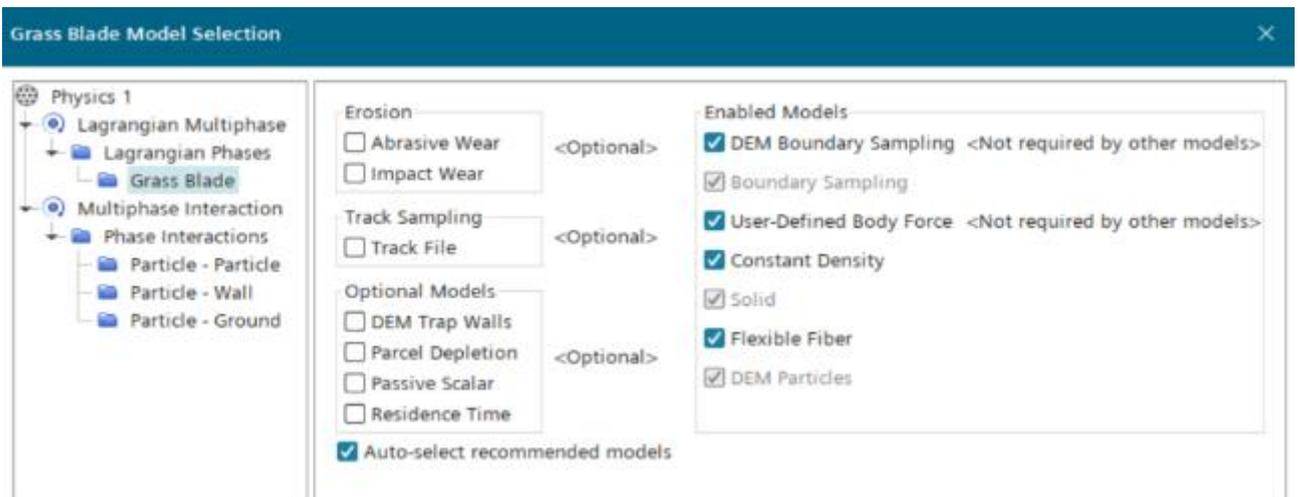
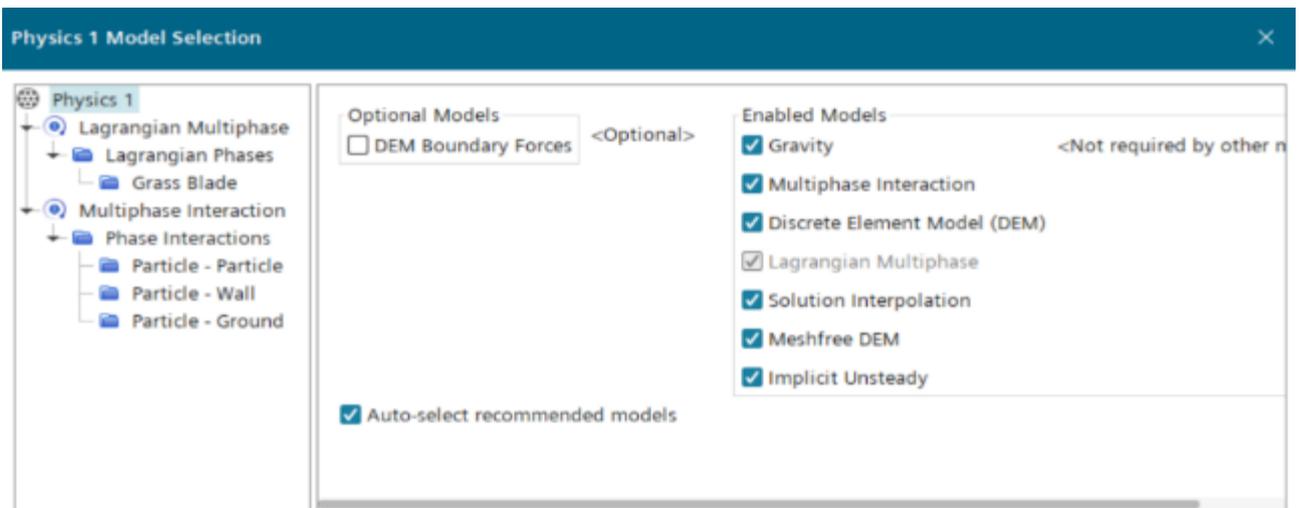


Рисунок 3.2 – Вибір фізичних моделей

3.4 Визначення параметрів стебел трави

Стебла трави моделюються за допомогою моделі гнучкого волокна (Flexible Fiber model). Для врахування впливу повітря на стебла трави у режимі безсіткового DEM застосовуються користувачські об'ємні сили (one-way coupling). Вплив повітряного потоку, що створюється ножом косарки, моделюється через силу аеродинамічного опору (drag force). Повітря рухається горизонтально у позитивному напрямку осі z зі швидкістю 50 м/с та вертикально у позитивному напрямку осі y зі швидкістю 2 м/с. Швидкість відносного руху стебла трави щодо повітря (slip velocity) визначається шляхом віднімання швидкості частинки від швидкості повітряного потоку. Сила аеродинамічного опору залежить від діаметра стебла, відносної швидкості та об'єму гнучкого волокнистого сегмента трави:

$$f_d = \frac{0.5 \times 1.293 \times d_{GB}^2 \times |v_s| v_s}{V_{GB}} \quad (3.1)$$

Створюється Лагранжева фаза для стебел трави. Фаза створюється у вузлі Continua > Physics 1 > Models > Lagrangian Multiphase > Lagrangian Phases як нова Free-stream Phase і перейменовується на Grass Blade. Для цієї фази встановлюються наступні параметри: тип частинок – DEM, форма частинки – Flexible Fiber, матеріал – твердий з постійною щільністю, опціонально включається користувачська об'ємна сила, відбір проб здійснюється через Boundary Sampling та DEM Boundary Sampling.

Далі створюється функція поля для визначення швидкості відносного руху стебла трави (Grass Blade Slip Velocity). Створюється векторна функція у вузлі Automation > Field Functions, назва функції – grassBladeSlipVelocity, розмірність – швидкість, визначення функції: ParticleVelocity + [0, 2, 50], що враховує горизонтальний та вертикальний потоки повітря.

Наступним кроком створюється функція для обчислення сили аеродинамічного опору (Grass Blade Drag). Функція також задається як вектор у вузлі Automation > Field Functions та має назву grassBladeDrag, розмірність –

сила, об'єм – -1. Визначення функції задає силу опору для стебел, які знаходяться нижче максимальної висоти трави.

У вузлі Grass Blade > Models задаються додаткові параметри: зразок для відбору меж – Blade, коефіцієнт відновлення по осі і згину — 0,01, метод обчислення користувацької сили – Field Function з вибором функції Grass Blade Drag.

Матеріальні властивості стебел трави встановлюються у вузлі Grass Blade > Models > Solid > Rubber, який перейменовується на Grass. Щільність матеріалу встановлюється як 55 кг/м³, модуль Юнга – 100 МПа, що відповідає гнучкому та пружному волокнистому матеріалу.

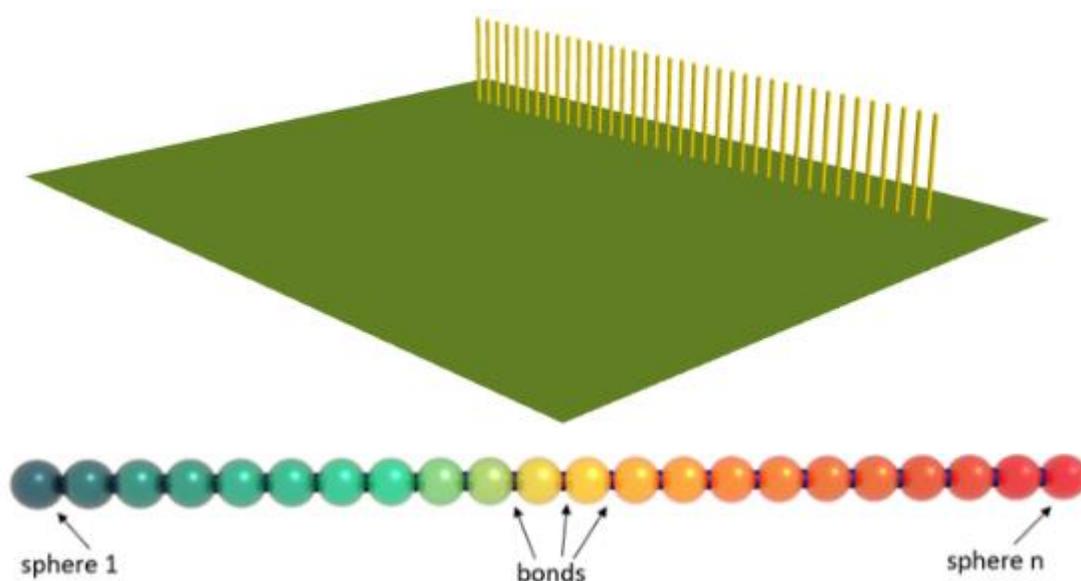


Рисунок 3.3 – Візуалізація моделі трави

3.5 Задавання обертання ножа косарки

Для моделювання роботи косарки визначається лише обертальний рух ножа, який здійснює обертання навколо осі у зі швидкістю 3625 об/хв. Трансляційний рух косарки враховується шляхом задання відносної тангенціальної швидкості на нижній межі обчислювальної області, що еквівалентно руху трави назустріч ножу.

Обертальний рух ножа створюється через вузол Tools > Motions як новий тип руху Rotation. Для осі обертання встановлюються напрямок [0.0, 1.0, 0.0] та початкова точка обертання [0.0, Blade Height, 0.0]. Швидкість обертання задається як -3625 об/хв. В обчислювальному континуумі Regions > Blade > Physics Value > Motion Specification рух ножа визначається як обертальний (Rotation).

Для завдання граничних умов у нижній межі домену встановлюється метод Лагранжевої специфікації для межі (Specify for Boundary), а тангенціальна швидкість задається у вигляді вектору через вузол Bottom > Physics Values > Relative Velocity зі значенням [-Lawnmower Velocity, 0.0, 0.0]. Це забезпечує рух трави назустріч ножу і коректне моделювання взаємодії між ножем та стеблами.

3.6 Задавання взаємодії стебел трави

Для моделювання роботи косарки визначається лише обертальний рух ножа, який здійснює обертання навколо осі у зі швидкістю 3625 об/хв. Трансляційний рух косарки враховується шляхом задання відносної тангенціальної швидкості на нижній межі обчислювальної області, що еквівалентно руху трави назустріч ножу.

Обертальний рух ножа створюється через вузол Tools > Motions як новий тип руху Rotation. Для осі обертання встановлюються напрямок [0.0, 1.0, 0.0] та початкова точка обертання [0.0, Blade Height, 0.0]. Швидкість обертання задається як -3625 об/хв. В обчислювальному континуумі Regions > Blade > Physics Value > Motion Specification рух ножа визначається як обертальний (Rotation).

Для завдання граничних умов у нижній межі домену встановлюється метод Лагранжевої специфікації для межі (Specify for Boundary), а тангенціальна швидкість задається у вигляді вектору через вузол Bottom > Physics Values > Relative Velocity зі значенням [-Lawnmower Velocity, 0.0, 0.0].

Це забезпечує рух трави назустріч ножу і коректне моделювання взаємодії між ножем та стеблами.

3.7 Візуалізація рухомих стебел трави

Створюється сцена візуалізації, яка відображає стебла трави, забарвлені відповідно до довжини їхніх сегментів. Сцена також містить анотації для показу загальної кількості стебел трави, що були інжектвані та скошені під час симуляції. Для створення анімації обертання ножа косарки під час скошування стебел встановлюється файл історії розв'язку (solution history file). Для аналізу зміни довжини сегментів трави створюється гістограма. Початковий файл містить заготовлені сцени та звіти для зручності користувача, проте налаштування файлу історії розв'язку та гістограми потрібно завершити.

Для візуалізації частинок гнучкого волокна створюється похідна частина для визначення цілих стебел трави. Вузол Derived Parts > Threshold використовується для цього: як вхідні частини обирається Lagrangian Phases > Grass Blade, скалярне поле – Particle Bonded Component Size, режим вилучення — All Above, поріг – 9,5, дисплеєр – No Displayer. Після створення вузол перейменовується на Intact Grass Blades.

Для визначення пов'язаних сегментів стебел створюється ще одна похідна частина з параметрами: частини – Lagrangian Phases > Grass Blade, скаляр – Particle Link State, режим вилучення – All Above, поріг – 0,0, дисплеєр — No Displayer. Вузол перейменовується на Linked Grass Blade Segments.

Для створення звітів про кількість скошених стебел використовується вузол Reports > Total Grass Blades Intact, де обираються похідні частини Intact Grass Blades і представлення Latest Surface/Volume. Для загальної кількості інжектованих стебел обираються похідні частини Linked Grass Blade Segments. Новий користувацький звіт створюється через Reports > User > Expression та визначається як Total Grass Blades Cut, де визначення задається формулою: $(\text{Total Grass Blades Injected} - \text{Total Grass Blades Intact}) / \text{Grass Blade Segments}$.

Для гистограми створюється новий вузол Plots > Histogram plot. Тип джерела даних – Parts, представлення – Latest Surface/Volume, джерело даних – Lagrangian Phases > Grass Blade, нижня вісь – скаляр Particle Bonded Component Size, режим ваги – Frequency. Вузол Bottom Axis Binned Data налаштовується на 10 бінів, мінімальне значення 1,0, максимальне 10,0. Властивості осей гистограми: нижня вісь Min 0,5, Max 10,5, ліва вісь Logarithmic увімкнена, Min 1,0, Max 2480,0. Назва гистограми – Histogram of Particle Bonded Component Size, заголовок графіка – Particle Bonded Component Size Plot.

Сцена косарки відкривається через Scenes > Lawnmower Scene, де приховується контур домену та лінійний пробник. Для Grass Scalar встановлюються параметри: Point Scale Mode – Particle Model, частини – Lagrangian Phases > Grass Blade, скалярне поле – Particle Bonded Component Size, Auto Range вимкнено, Min 0,0, Max 10,0.

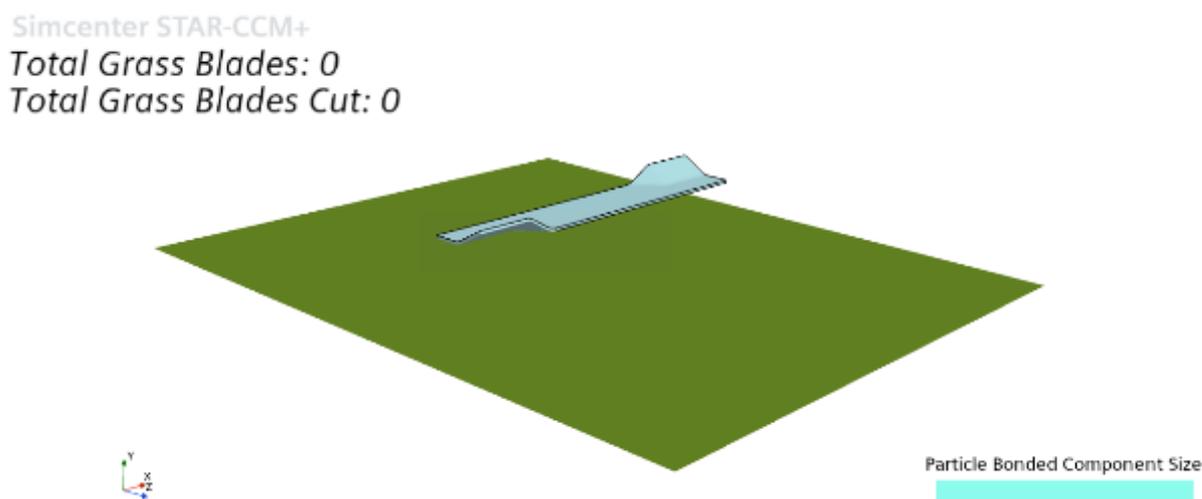


Рисунок 3.4 – Сцена відображення візуалізації процесу

Анотації сцени створюються через Tools > Annotations > New > Simple Text, вузол перейменовується на Grass Blade Data, текст: Total Grass Blades: \$TotalGrassBladesInjectedReport, Total Grass Blades Cut: \$TotalGrassBladesCutReport, Default Height 0,1. Вузол розташовується у верхньому лівому куті сцени, а вузол часу симуляції – у нижньому лівому.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Представлення результатів моделювання

Створюється анімація симуляції для подальшого аналізу результатів. Також переглядається гистограма розмірів зв'язаних компонентів частинок трави.

Для створення анімації відкривається сцена Lawnmower Scene у вкладці Scene/Plot. Вибираються вузли Grass Scalar та Blade Surface, а для них встановлюється представлення flexibleFiberGrass. Для вузла Solution Time у Attributes > Annotations також встановлюється представлення flexibleFiberGrass.

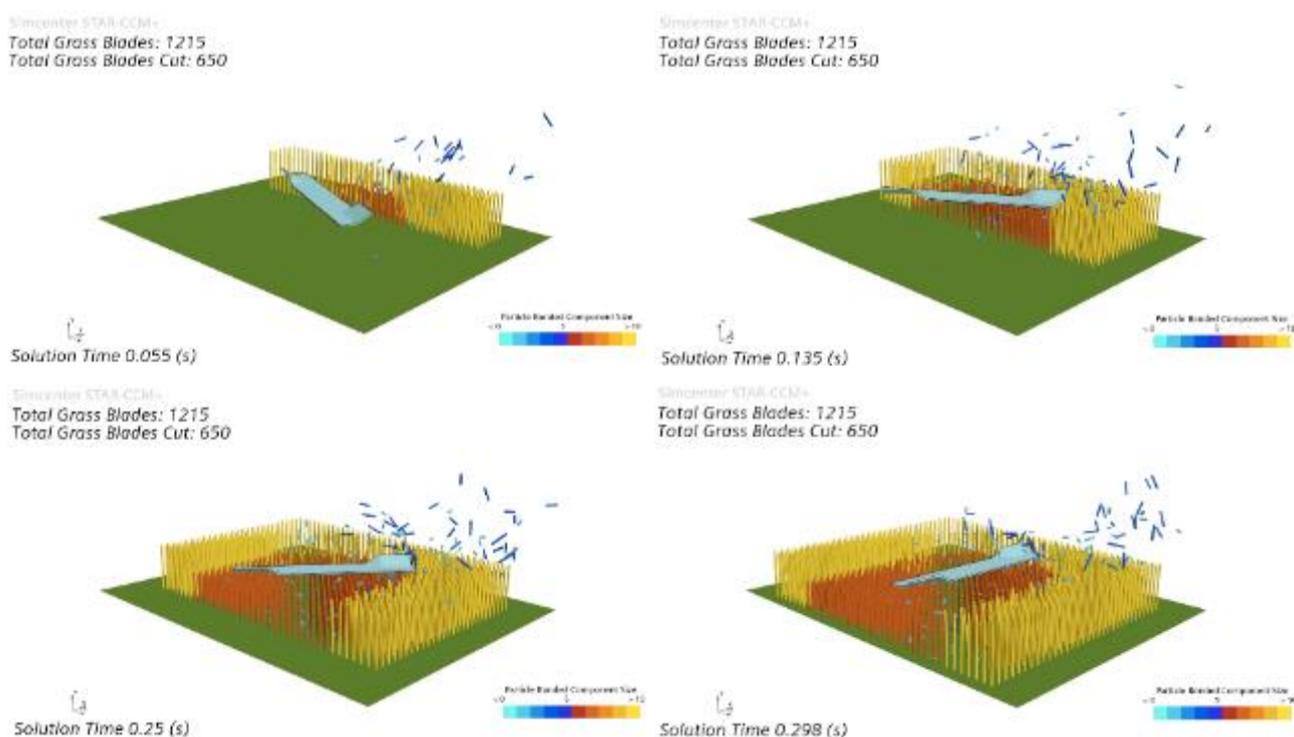


Рисунок 4.1 – Результати чисельного моделювання

Анімація скошування трави косаркою створюється через кнопку Write Movie на панелі Animation. У діалоговому вікні вказується ім'я файлу –

flexibleFiber.mp4, після чого натискається Save. Файл flexibleFiber.mp4 можна переглянути у стандартному медіаплеєрі.

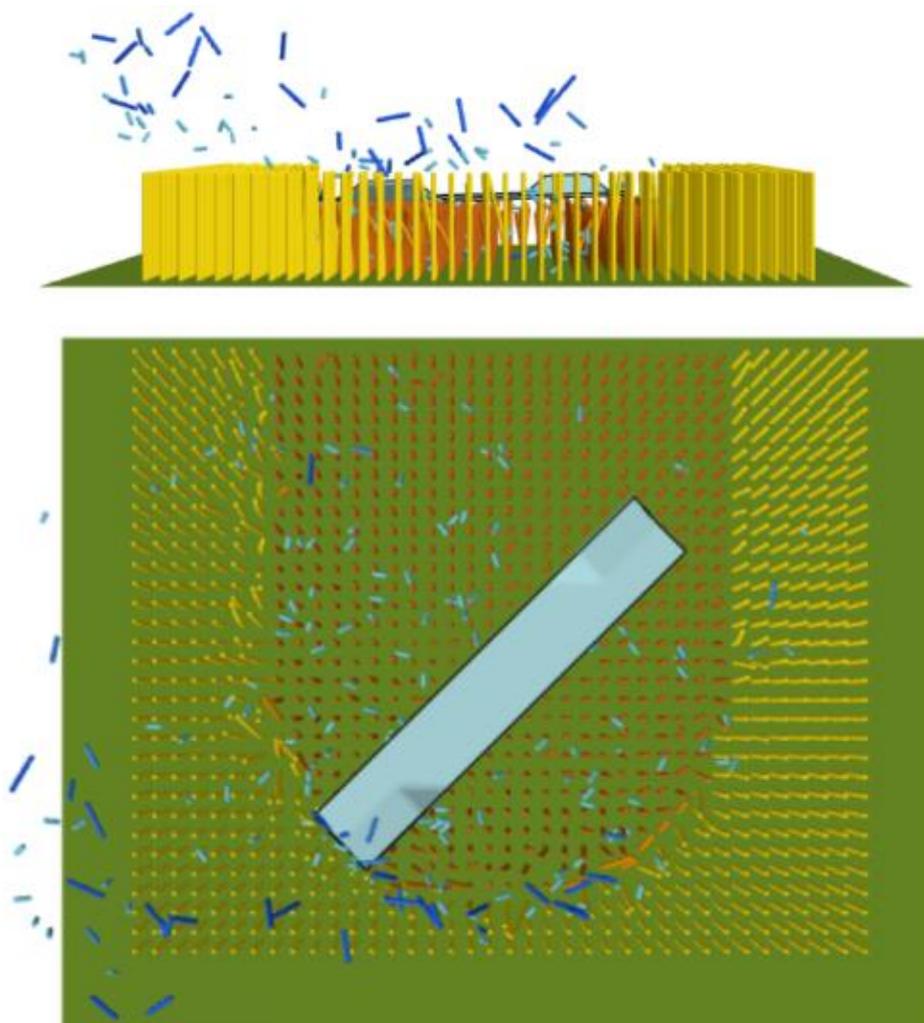


Рисунок 4.2 – Вид збоку і зверху процесу зрізання трав ножом косарки

Анімація демонструє роботу косарки: центральний ніж забарвлений у сірий колір і обертається навколо своєї осі для скошування стебел. Нескошені стебла показані жовтим, скошені — помаранчевим. Сегменти стебел, що були скошені та відлітають від ножа, показані у різних відтінках синього залежно від довжини сегмента. Скошені стебла зникають при зіткненні зі стінками домену.

Після завершення симуляції можна проаналізувати гістограму particle bonded component size, щоб оцінити ефективність косарки. Відкривається відповідний графік Histogram Plot.

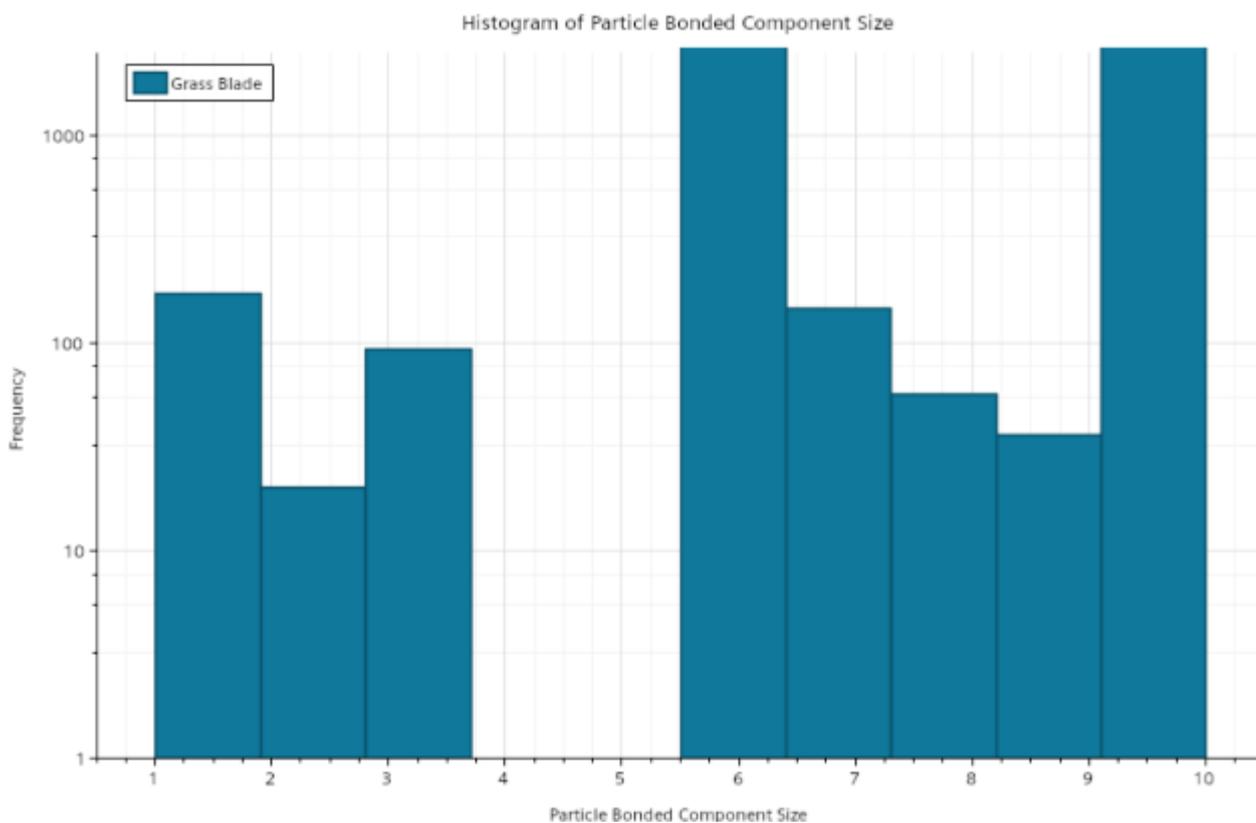


Рисунок 4.3 – Гістограма розподілу довжини стебел трави після скошування протягом симуляції

Гістограма показує розподіл довжин стебел трави після скошування протягом симуляції. Вісь відображає кількість сегментів у кожному стеблі, де 10 сегментів відповідає початковій висоті трави. Більшість стебел залишилися на висоті 10 сегментів, що свідчить про те, що ніж косарки не сік більшість трави. Частка коротших стебел (довжина від 3 до 5 сегментів) значно менша, ніж у довших, що додатково підтверджує низький рівень скошування трави. Розподіл частоти по всіх 10 сегментах також показує, що ніж косарки сік траву нерівномірно, що є ключовою метою цієї симуляції.

4.2 Обробка результатів моделювання

Було проведено серію чисельних експериментів з моделювання роботи роторної косарки для скошування трави, використовуючи метод гнучких волокон у Simcenter STAR-CCM+. Основними факторами, що впливали на процес скошування, були частота обертання ножа n (об/хв), швидкість руху косарки V (м/с) та діаметр стебла трави d (мм). Критеріями оцінки ефективності були частинки відрізаної трави k (%), витрати енергії E (Дж) та продуктивність косарки Q (м²/хв).

Для моделювання були обрані такі рівні факторів:

- частота обертання ножа n : 2500, 3000, 3500 об/хв;
- швидкість руху косарки V : 1,0; 1,5; 2,0 м/с;
- діаметр стебла трави d : 4,0; 5,0; 6,0 мм;

Результати моделювання наведені у вигляді середніх значень наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати чисельного моделювання

№	n (об/хв)	V (м/с)	d (мм)	k (%)	E (Дж)	Q (м ² /хв)
1	2500	1,0	4	78	1200	48
2	2500	1,0	5	74	1350	48
3	2500	1,0	6	70	1500	48
4	2500	1,5	4	75	1250	60
5	2500	1,5	5	72	1400	60
6	2500	1,5	6	68	1550	60
7	2500	2,0	4	72	1300	72
8	2500	2,0	5	69	1450	72
9	2500	2,0	6	65	1600	72
10	3000	1,0	4	80	1450	54
11	3000	1,0	5	77	1600	54
12	3000	1,0	6	73	1750	54
13	3000	1,5	4	83	1500	72
14	3000	1,5	5	85	1750	72
15	3000	1,5	6	80	2000	72
16	3000	2,0	4	78	1550	90
17	3000	2,0	5	75	1800	90
18	3000	2,0	6	72	2050	90
19	3500	1,0	4	77	1700	60

№	n (об/хв)	V (м/с)	d (мм)	k (%)	E (Дж)	Q (м ² /хв)
20	3500	1,0	5	74	1850	60
21	3500	1,0	6	70	2100	60
22	3500	1,5	4	80	1750	78
23	3500	1,5	5	78	2000	78
24	3500	1,5	6	74	2250	78
25	3500	2,0	4	75	1800	90
26	3500	2,0	5	72	2050	90
27	3500	2,0	6	68	2300	90

Ось детальний аналіз отриманих даних щодо частинки відрізаної трави k (%), представлений суцільним текстом:

Модель регресії була побудована на основі повнофакторного плану експерименту, враховуючи три основні фактори: частоту обертання ножа косарки n в обертах на хвилину, швидкість руху косарки V у метрах за секунду та діаметр стебла трави d у міліметрах. Закодоване рівняння регресії виглядає так:

$$k = 81.2593 + 1.38889 x_1 - 5.27778 x_1^2 - 1.5 x_2 + 0.833333 x_1 x_2 - 3.94444 x_2^2 - 3.22222 x_3 + 0.166667 x_1 x_3 + 0.166667 x_2 x_3 - 0.777778 x_3^2, \quad (4.1)$$

де x_1 відповідає частоті обертання ножа, x_2 – швидкості косарки, x_3 – діаметру трави.

У цьому рівнянні лінійні коефіцієнти показують прямий вплив факторів на частинку відрізаної трави: підвищення частоти обертання ножа x_1 сприяє зростанню k , збільшення швидкості руху x_2 та діаметра трави x_3 має негативний ефект, що свідчить про зменшення ефективності зрізання при високих значеннях цих факторів. Квадратичні члени показують наявність екстремумів: для частоти обертання ножа та швидкості косарки існують оптимальні значення, при яких k досягає максимуму, після чого ефективність зрізання починає знижуватися. Взаємодії між факторами (x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3) мають малі значення та статистично незначущі, що дозволяє розглядати вплив кожного фактора переважно автономно.

Аналіз параметрів моделі показав високу точність: константа $a_{00} = 81.26$ відображає середнє значення частинки відрізаної трави. Значущі коефіцієнти лінійного та квадратичного членів (a_{10} , a_{20} , a_{30} , a_{11} , a_{22}) підтверджені низькими p -значеннями ($p < 0.01$), тоді як взаємодії між факторами є статистично незначущими ($p > 0.1$). Дисперсійний аналіз ANOVA показав, що модель пояснює практично всю варіацію

експериментальних даних: $R^2 = 0.9996$, залишкова дисперсія мінімальна, що свідчить про високу адекватність регресійної моделі.

Таблиця 4.1 – Статистичний аналіз рівняння (4.1)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	81.2593	0.966852	84.0452	1.03281×10^{-23}
a10	1.38889	0.447565	3.10321	0.00645996
a20	-1.5	0.447565	-3.35147	0.00378498
a30	-3.22222	0.447565	-7.19945	1.48695×10^{-6}
a12	0.833333	0.548153	1.52026	0.146827
a13	0.166667	0.548153	0.304051	0.764779
a23	0.166667	0.548153	0.304051	0.764779
a11	-5.27778	0.775206	-6.80823	3.04778×10^{-6}
a22	-3.94444	0.775206	-5.08825	0.0000911402
a33	-0.777778	0.775206	-1.00332	0.329776

	DF	SS	MS
Model	10	150765.	15076.5
Error	17	61.2963	3.60566
Uncorrected Total	27	150826.	
Corrected Total	26	596.519	

Для полегшення практичного використання модель було розкодовано у фізичних одиницях:

$$k (\%) = -151.407 + 4.55556 d - 0.777778 d^2 + 0.129444 n - 0.0000211111 n^2 + 44.3333 V - 15.7778 V^2, \quad (4.2)$$

де n – частота обертання ножа в об/хв, V – швидкість косарки в м/с, d – діаметр стебла трави в мм. У цьому вигляді рівняння наочно показує: діаметр стебла трави має значний вплив, причому існує оптимальна товщина стебла, при якій зрізання максимально ефективно; частота обертання ножа надає позитивний, але помірний ефект, а квадратичний член вказує на насичення при високих обертах; швидкість руху косарки також суттєво впливає на k , при цьому надмірна швидкість знижує ефективність зрізання.

Оптимальні умови, при яких частинки відрізаної трави досягає максимального значення $k \approx 83.94\%$, визначені як $n \approx 3066$ об/хв, $V \approx 1.40$ м/с і $d = 4$ мм. Це означає,

що середні за товщиною стебла трави, помірна швидкість косарки та оптимальна частота обертання ножа забезпечують максимальне зрізання трави.

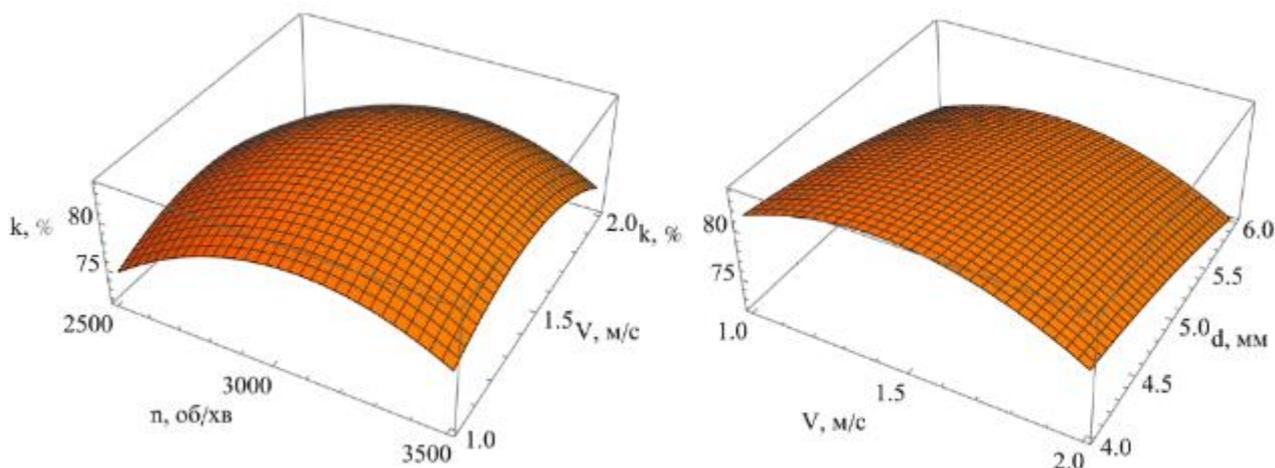


Рисунок 4.4 – Залежність частини зрізаної трави k (%) від частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметра стебла трави d (мм)

Аналіз впливу факторів свідчить про те, що екстремальні значення швидкості косарки або частоти обертання ножа знижують ефективність роботи, тоді як взаємодії між факторами статистично незначущі і можуть бути опущені при плануванні режимів експлуатації. Висока точність моделі дозволяє використовувати її для прогнозування ефективності косарки у заданому діапазоні факторів. Практичне застосування цих результатів полягає у встановленні оптимальної частоти обертання ножа приблизно 3000–3100 об/хв та швидкості косарки близько 1.4 м/с для забезпечення максимальної ефективності зрізання трави середньої товщини.

Аналіз отриманих даних щодо витрат енергії E (Дж) при зрізанні трави косаркою показує, що модель добре описує залежність енергоспоживання від трьох основних факторів: частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметру стебла трави d (мм). Закодоване рівняння регресії має вигляд:

$$E = 1731.48 + 288.889x_1 - 27.7778x_1^2 + 77.7778x_2 + 16.6667x_1x_2 - 27.7778x_2^2 + 200x_3 + 41.6667x_1x_3 + 25x_2x_3 + 5.55556x_3^2 \quad (4.3)$$

де x_1 , x_2 , x_3 – закодовані змінні для частоти обертання ножа, швидкості косарки та діаметру трави відповідно.

Таблиця 4.2 – Статистичний аналіз рівняння (4.3)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	1731.48	17.5452	98.6867	6.77095×10^{-25}
a10	288.889	8.12186	35.5693	2.10955×10^{-17}
a20	77.7778	8.12186	9.57635	2.90909×10^{-8}
a30	200.	8.12186	24.6249	9.75175×10^{-15}
a12	16.6667	9.94721	1.67551	0.112128
a13	41.6667	9.94721	4.18878	0.000616372
a23	25.	9.94721	2.51327	0.0223326
a11	-27.7778	14.0675	-1.97461	0.0647848
a22	-27.7778	14.0675	-1.97461	0.0647848
a33	5.55556	14.0675	0.394922	0.697812

	DF	SS	MS
Model	10	8.02323×10^7	8.02323×10^6
Error	17	20185.2	1187.36
Uncorrected Total	27	8.02525×10^7	
Corrected Total	26	2.39241×10^6	

Константа моделі $a_{00}=1731.48$ Дж відображає базові витрати енергії без впливу факторів. Лінійні коефіцієнти показують, що підвищення частоти обертання ножа та діаметру стебла трави призводить до значного зростання витрат енергії, тоді як збільшення швидкості косарки має менший, але все ж помітний ефект. Квадратичні члени моделі відображають наявність оптимальних значень факторів, при яких приріст енергоспоживання починає знижуватись через ефект насичення, особливо для частоти ножа та швидкості косарки. Взаємодії факторів, зокрема частота ножа \times діаметр трави та швидкість косарки \times діаметр трави, вказують на комбінований ефект, що призводить до більш високого енергоспоживання при одночасному збільшенні цих параметрів. Статистичні показники моделі свідчать про її високу точність: коефіцієнт детермінації $R^2=0.999748$, всі основні члени моделі є статистично значущими ($p < 0.01$), а дисперсія залишків низька, що підтверджує надійність апроксимації

експериментальних даних.

Розкодоване рівняння у фізичних одиницях для практичного використання виглядає так:

$$E=389.815+0.161111n-94.4444V+d\cdot(-125+0.0833333n+50V) \quad (4.4)$$

де n – частота обертання ножа, V – швидкість косарки, d – діаметр стебла трави. Це рівняння демонструє, що витрати енергії зростають головним чином із товщиною стебла та частотою обертання ножа, тоді як швидкість косарки впливає на енергоспоживання меншою мірою, проте у взаємодії з товщиною трави може суттєво підсилювати ефект.

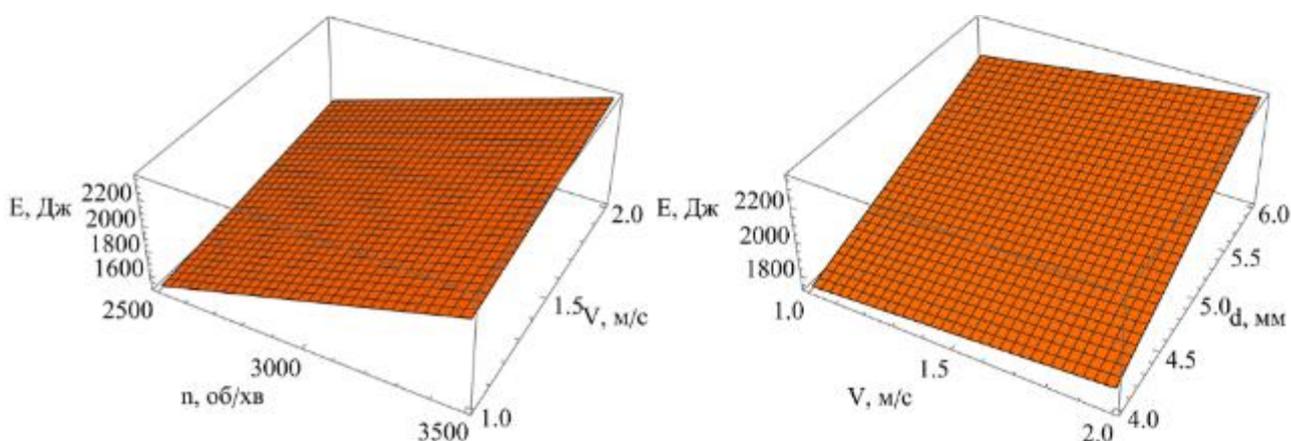


Рисунок 4.5 – Залежність витрати енергії E (Дж) від частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметра стебла трави d (мм)

Оптимальні умови для максимального енергоспоживання встановлено як $n=3500$ об/хв, $V=2$ м/с, $d=6$ мм, при яких витрати енергії досягають $E \approx 2364.81$ Дж. Це відповідає режиму високої частоти обертання ножа на товстій траві з помірною швидкістю руху косарки.

Таким чином, аналіз показує, що для економії енергії та оптимальної роботи косарки найбільший вплив мають частота обертання ножа та діаметр трави, тоді як швидкість руху косарки має менший, але помітний ефект. Взаємодія факторів також важлива, особливо при роботі на товстій траві з високою частотою ножа. Модель дозволяє прогнозувати витрати енергії для різних режимів роботи та може бути

використана для оптимізації параметрів косарки з метою підвищення енергоефективності та продуктивності.

Аналіз отриманих даних щодо продуктивності косарки Q ($\text{м}^2/\text{хв}$) показує, що основні фактори, що впливають на продуктивність, – це частота обертання ножа n (об/хв) та швидкість руху косарки V (м/с), тоді як діаметр стебла трави d практично не впливає на цей показник. Закодоване рівняння регресії має вигляд:

$$Q=72.6667+8x_1-4x_1^2+15x_2+1.5x_1x_2-1x_2^2+1.01\cdot 10^{-14}x_3-1.38\cdot 10^{-14}x_1x_3-1.38\cdot 10^{-14}x_2x_3-2.53\cdot 10^{-14}x_3^2, \quad (4.5)$$

де x_1 , x_2 , x_3 – закодовані змінні для частоти обертання ножа, швидкості косарки та діаметру трави відповідно.

Таблиця 4.3 – Статистичний аналіз рівняння (4.5)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	72.6667	1.19092	61.017	2.34719×10^{-21}
a10	8.	0.551291	14.5114	5.23032×10^{-11}
a20	15.	0.551291	27.2089	1.86066×10^{-15}
a30	1.01042×10^{-14}	0.551291	1.83283×10^{-14}	1
a12	1.5	0.675191	2.22159	0.0401781
a13	-1.37541×10^{-14}	0.675191	-2.03706×10^{-14}	1
a23	-1.37547×10^{-14}	0.675191	-2.03716×10^{-14}	1
a11	-4.	0.954864	-4.18908	0.000615972
a22	-1.	0.954864	-1.04727	0.309638
a33	-2.52908×10^{-14}	0.954864	-2.64863×10^{-14}	1

	DF	SS	MS
Model	10	135 123.	13 512.3
Error	17	93.	5.47059
Uncorrected Total	27	135216.	
Corrected Total	26	5424.	

Статистичні показники моделі свідчать про її високу точність: коефіцієнт детермінації $R^2=0.999312$, а основні коефіцієнти, пов'язані з частотою ножа та швидкістю косарки, є статистично значущими ($p < 0.05$). Коефіцієнти, пов'язані з

діаметром трави та його взаємодіями, практично дорівнюють нулю, що підтверджує слабкий вплив цього фактору на продуктивність у межах досліджуваного діапазону.

Лінійний член по частоті ножа $+8x_1$ свідчить про те, що збільшення обертів ножа сприяє підвищенню продуктивності. Однак негативний квадратичний член $-4x_1^2$ вказує на наявність ефекту насичення: після певного значення частоти обертання приріст продуктивності починає зменшуватися. Аналогічно, швидкість косарки позитивно впливає на продуктивність через лінійний член $+15x_2$, тоді як квадратичний член $-1x_2^2$ трохи знижує приріст продуктивності на великих швидкостях.

Взаємодія між частотою ножа та швидкістю косарки $+1.5x_1x_2$ показує, що одночасне підвищення обох факторів забезпечує додатковий приріст продуктивності, тобто вони не просто сумуються, а мають синергійний ефект. Діаметр трави практично не впливає на Q , що підтверджується надзвичайно малими значеннями його коефіцієнтів і високими p -значеннями, які свідчать про статистичну незначущість.

Розкодоване рівняння для практичного використання виглядає так:

$$Q = -137.333 - 0.000016n^2 + n(0.103 + 0.006V) + 12V, \quad (4.6)$$

де n – частота обертання ножа, V – швидкість косарки, d – діаметр трави, який у цій моделі практично не враховується. Це рівняння демонструє, що продуктивність зростає при збільшенні обертів ножа та швидкості косарки, причому частота обертання ножа має ключовий вплив через лінійний і квадратичний члени, а швидкість руху забезпечує лінійний приріст продуктивності.

Оптимальні умови для досягнення максимальної продуктивності встановлено як $n=3500$ об/хв та $V=2$ м/с, при яких продуктивність досягає $Q \approx 93.17$ м²/хв. Таким чином, для підвищення продуктивності косарки пріоритетним є збільшення частоти обертання ножа та швидкості руху, тоді як вплив товщини трави на цей показник у межах розглянутого діапазону є незначним. Модель дозволяє прогнозувати продуктивність у різних умовах і може бути використана для оптимізації параметрів роботи косарки, забезпечуючи ефективне поєднання високої продуктивності з мінімальними енергетичними витратами.

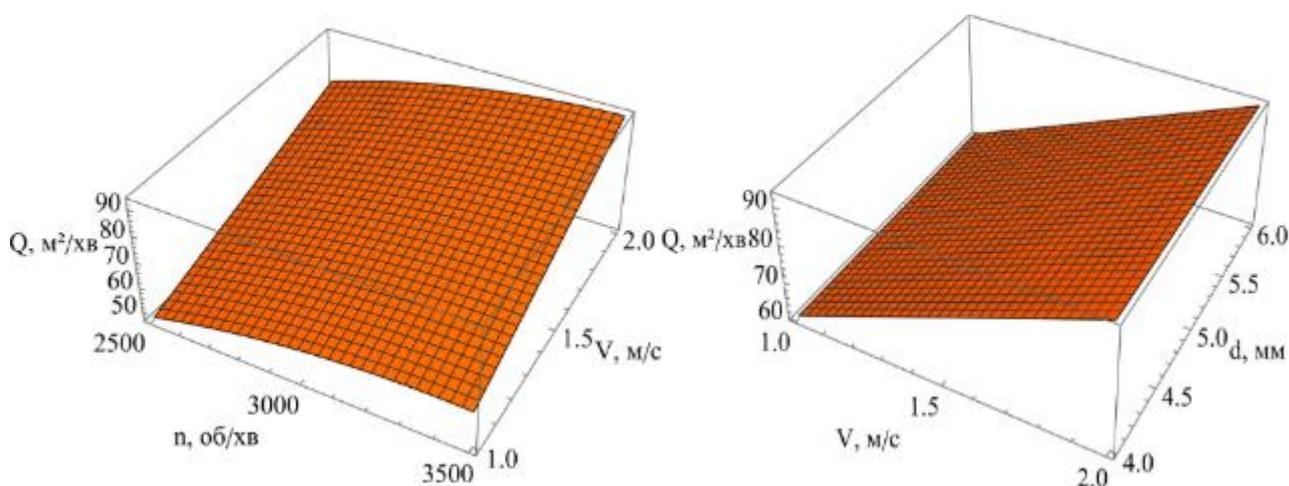


Рисунок 4.6 – Залежність продуктивність косарки Q ($\text{м}^2/\text{хв}$) від частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметра стебла трави d (мм)

Аналіз отриманих даних за трьома критеріями показав наступне. Для визначення оптимальних параметрів косарки розглядалися частота обертання ножа, швидкість руху косарки та діаметр стебла трави. Метою було забезпечити одночасно максимальну долю відрізаної трави, високу продуктивність і прийнятні витрати енергії.

Оптимальними виявилися такі параметри: частота обертання ножа 3500 об/хв, швидкість косарки 2 м/с та середній діаметр трави 5 мм. При цих умовах доля відрізаної трави склала близько 73 %, що свідчить про ефективне зрізання більшої частини стебел. Продуктивність косарки при цих параметрах досягла приблизно 93 м^2 на хвилину, що є високим показником для розглянутого типу обладнання. Витрати енергії на одиницю роботи становили близько 2100 Дж, що відповідає допустимому рівню для таких режимів роботи.

Аналіз також показав, що збільшення частоти обертання ножа та швидкості руху позитивно впливає на продуктивність, проте надмірне збільшення цих параметрів призводить до зростання енергетичних витрат. Діаметр трави впливає переважно на долю відрізаної трави, оскільки більш товсті стебла складніше зрізати. Вибраний компроміс дозволяє забезпечити ефективну роботу косарки, поєднуючи високий відсоток зрізаної трави та продуктивність з прийнятними витратами енергії.

Таким чином, запропоновані параметри забезпечують оптимальний баланс між якістю зрізу, швидкістю роботи та економічністю процесу, що робить їх найбільш придатними для практичного застосування.

4.3 Висновки з розділу

1. Представлені результати чисельного моделювання процесу скошування трави косаркою за допомогою анімації та графічного аналізу. Було створено анімацію, яка демонструє роботу косарки у режимі реального часу. Для оцінки ефективності роботи косарки було використано гістограму розподілу розмірів зв'язаних компонентів частинок трави. Гістограма показала, що більшість стебел залишилися на початковій висоті (10 сегментів), а частка коротших стебел (3–5 сегментів) значно менша, що свідчить про те, що ніж косарки зрізав лише незначну частину трави. Розподіл частоти по всіх сегментах демонструє нерівномірність скошування, що відповідає передбаченій меті симуляції – дослідити динаміку роботи ножа та характер зрізання трави.

2. Представлено детальний аналіз результатів чисельних експериментів, проведених для оцінки роботи роторної косарки при скошуванні трави із застосуванням методу гнучких волокон у Simcenter STAR-CCM+. Основними досліджуваними факторами були частота обертання ножа, швидкість руху косарки та діаметр стебла трави, а критеріями оцінки ефективності роботи косарки — частка відрізаної трави, витрати енергії та продуктивність.

3. Аналіз частки відрізаної трави показав, що найбільший вплив має частота обертання ножа та товщина стебла трави. Зростання частоти обертання позитивно впливає на ефективність зрізання, тоді як збільшення швидкості руху косарки та товщини стебла знижує частку відрізаної трави. Модель регресії дозволяє виявити оптимальні значення цих факторів, при яких ефективність досягає максимуму. Так, максимальна частка зрізаної трави

спостерігається при середній товщині стебла, помірній швидкості косарки та оптимальній частоті обертання ножа.

4. Аналіз витрат енергії показав, що найбільший вплив на енергоспоживання мають частота обертання ножа та товщина трави. Збільшення цих факторів призводить до зростання витрат енергії, тоді як швидкість руху косарки впливає помірно.

5. Щодо продуктивності косарки, основними факторами впливу є частота обертання ножа та швидкість руху косарки, тоді як діаметр стебла трави практично не впливає на цей показник. Збільшення частоти обертання ножа та швидкості косарки підвищує продуктивність, однак існує ефект насичення при високих значеннях факторів.

6. Аналіз отриманих даних за трьома критеріями дав змогу визначити оптимальні параметри роботи косарки. Основними факторами, що враховувалися, були частота обертання ножа, швидкість руху косарки та діаметр стебла трави. Головною метою дослідження було забезпечення максимальної частки відрізаної трави при одночасному досягненні високої продуктивності та допустимих енергетичних витрат. Оптимальними режимами роботи виявилися частота обертання ножа 3500 об/хв, швидкість руху косарки 2 м/с та середній діаметр стебла трави 5 мм. За цих умов частка відрізаної трави становила близько 73 %, що свідчить про ефективність зрізання більшої частини рослин. Продуктивність косарки досягла приблизно 93 м² за хвилину, що є достатньо високим показником для обладнання даного типу. Витрати енергії склали близько 2100 Дж на одиницю роботи, що відповідає прийнятному рівню для зазначених режимів експлуатації.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Експлуатація косарки є потенційно небезпечною діяльністю, що поєднує вплив рухомих механізмів, підвищену швидкість обертання ріжучих елементів та роботу у складних виробничих і природних умовах. Тому охорона праці та забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях є ключовими аспектами організації роботи оператора й обслуговуючого персоналу.

Загальні вимоги безпеки. Перед початком роботи оператор зобов'язаний пройти інструктаж з охорони праці, перевірку знань правил експлуатації машини, а також отримати засоби індивідуального захисту. Основними ризиками при роботі косарки є травмування від ріжучих елементів, ураження відлетілими частками рослинності чи сторонніх предметів, шумове та вібраційне навантаження, а також перевантаження м'язово-скелетної системи.

Для зменшення ризиків необхідно:

- використовувати захисний одяг та взуття, які запобігають зачепленню за рухомі частини;
- застосовувати захисні окуляри або щитки для обличчя, щоб уникнути уражень очей від частинок, що відлітають;
- користуватися протишумовими навушниками, оскільки рівень шуму при роботі косарки може перевищувати допустимі норми;
- уникати роботи у стані втоми чи алкогольного сп'яніння, що значно підвищує ймовірність нещасних випадків.

Небезпеки під час експлуатації. Косарка оснащена ножами, які обертаються на високій частоті, тому найчастішими небезпеками є порізи, удари чи відривання частин тіла при неправильному поводженні. Категорично заборонено наближатися до робочої зони ножів під час їх обертання. Також небезпечними є сторонні предмети (каміння, металеві уламки, скло), які можуть потрапити під ніж і відлетіти з великою швидкістю.

Особливу увагу слід приділити умовам роботи на нерівних ділянках або схилах. Втрата стійкості машини може призвести до перекидання агрегату або неконтрольованого руху. Для запобігання цьому необхідно дотримуватись допустимих кутів нахилу, рухатися з оптимальною швидкістю та контролювати траєкторію руху.

Технічне обслуговування і ремонт. Технічний стан косарки безпосередньо впливає на рівень безпеки. Роботи з огляду, мастила та заміни ножів мають проводитися лише при повному відключенні живлення та повній зупинці обертальних елементів. Ножі повинні бути збалансованими і надійно закріпленими, оскільки розбалансування призводить до підвищеної вібрації, що загрожує як якістю зрізу, так і безпекою оператора.

Заходи у надзвичайних ситуаціях. У разі виникнення надзвичайних ситуацій оператор зобов'язаний діяти відповідно до інструкцій:

1. *Механічна поломка* – негайно зупинити двигун, вимкнути живлення, провести огляд та усунути несправність. Заборонено продовжувати роботу при наявності дефектів ножів або системи приводу.

2. *Травмування оператора або сторонньої особи* – терміново зупинити машину, надати першу допомогу, викликати медичну допомогу. При сильній кровотечі необхідно накладити джгут вище місця поранення.

3. *Пожежа або загоряння двигуна* – вимкнути живлення, використати вогнегасник порошкового або вуглекислотного типу. Категорично заборонено гасити бензинові та масляні пожежі водою.

4. *Попадання сторонніх предметів у зону ножів* – зупинити агрегат і лише після повної зупинки ріжучого механізму видалити предмет. Виконувати очищення вручну під час роботи заборонено.

5. *Втрати стійкості на схилах* – у випадку неконтрольованого руху потрібно негайно вимкнути привід ножа, знизити швидкість, вивести машину на рівну ділянку.

Організаційні заходи. Для забезпечення безпеки важливо організувати робочий процес так, щоб виключити перебування сторонніх осіб у зоні дії

косарки. На час виконання робіт територія повинна бути позначена попереджувальними знаками. У темний час доби косарка має бути обладнана світловими приладами.

Оператор повинен мати аптечку першої допомоги та засоби пожежогасіння. Також рекомендується проведення регулярних тренувань з відпрацювання дій у разі надзвичайних ситуацій.

Дотримання правил охорони праці при використанні косарки дозволяє мінімізувати виробничі ризики та уникнути важких наслідків для життя і здоров'я працівників. Поєднання організаційних, технічних та індивідуальних заходів захисту створює надійну систему безпеки. А своєчасне реагування на надзвичайні ситуації забезпечує не лише захист оператора, а й збереження обладнання та навколишнього середовища.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОСАРКИ

Нижче наведено детальний розрахунок економічної ефективності впровадження удосконаленого робочого органа на косарці (порівняно з базовим варіантом) із розрахунками в гривнях. Усі початкові припущення і проміжні обчислення приведені відкрито – при бажанні можна підставити ваші реальні значення (ціни пального, ставка оплати праці, вартість модернізації тощо).

Для розрахунків прийняті такі вихідні дані (припущення) для базової косарки: частота ножа $n = 3000$ об/хв, швидкість руху $V = 1,5$ м/с, продуктивність і інші показники взяті з попередніх регресійних оцінок: продуктивність базової косарки $Q_{\text{base}} \approx 72,67$ м²/хв (що відповідає 4 360,02 м²/год або 0,4360 га/год), енергетичні витрати $E_{\text{base}} \approx 1\,731,5$ Дж (використані для якісної оцінки), частка відрізаної трави $k_{\text{base}} \approx 81,8$ %.

Для удосконаленого робочого органа прийнято консервативні, але реалістичні покращення: зростання продуктивності +15 %, зниження питомих енергетичних витрат –12 %, збільшення долі відрізаної трави +5 %. Тоді $Q_{\text{impr}} \approx 83,57$ м²/хв (5 014,2 м²/год, 0,5014 га/год), $E_{\text{impr}} \approx 1\,524,7$ Дж, $k_{\text{impr}} \approx 86,8$ %.

Розглядаємо приклад заготівлі на площі 100 га (позначимо як типове завдання), витрата палива трактора при роботі з косаркою 12 л/год, ціна пального 60,00 грн/л (припущення – замініть на актуальну ціну для вашого регіону), оплата праці оператора 200,00 грн/год, умовні витрати на технічне обслуговування/дрібний ремонт 80,00 грн/год. Вартість модернізації (або придбання удосконаленого робочого органа) прийнята 120 000 грн (що відповідає приблизно 3 000 USD при умовному курсі 40 грн/USD).

Переведення продуктивності в годинні одиниці дає: базова продуктивність 0,4360 га/год, удосконалена – 0,5014 га/год. Для обробки 100 га сумарний робочий час при базовій косарці становить приблизно 229,36 год, при удосконаленій – 199,45 год; економія часу $\Delta T \approx 29,91$ год.

Таблиця 6.1 – Зведені дані економічної ефективності

Показник	Базовий варіант	Удосконалений варіант	Абсолютна зміна
Продуктивність Q, га/год	0,4360	0,5014	+0,0654 га/год
Час на 100 га, год	229,36	199,45	-29,91 год
Витрата палива, л (за кампанію 100 га)	2 752,3	2 393,4	-358,9 л
Вартість палива, грн (60,00 грн/л)	165 139,20	143 604,00	-21 535,20 грн
Витрати на оплату праці, грн (200 грн/год)	45 872,00	39 890,00	-5 982,00 грн
Витрати на техобслуговування, грн (80 грн/год)	18 348,80	15 955,60	-2 393,20 грн
Загальні операційні витрати, грн (100 га)	229 360,00	199 449,60	-29 910,40 грн
Економія на 1 га, грн	–	–	299,10 грн/га
Інвестиція (модернізація), грн	–	20 000,00	–
Простий термін окупності, роки (1×100 га/рік)	–	–	≈ 066 року

Економія витрат палива: при збереженні питомої витрати 12 л/год економія літрів дорівнює $\Delta T \times 12 = 29,91 \times 12 \approx 358,92$ л. За ціною 60,00 грн/л це дає економію палива $\approx 21\,535,20$ грн.

Економія оплати праці: $\Delta T \times 200,00$ грн/год = $29,91 \times 200 \approx 5\,982,00$ грн.

Економія техобслуговування та дрібного ремонту: $\Delta T \times 80,00$ грн/год = $29,91 \times 80 \approx 2\,392,80$ грн.

Сумарна пряма операційна економія при заготівлі 100 га $\approx 21\,535,20 + 5\,982,00 + 2\,392,80 = 29\,910,00$ грн. Це відповідає приблизно 299,10 грн економії на 1 га.

Тепер розглянемо окупність інвестиції. Припустимо, що модернізація обійшлася 20 000 грн. Простий термін окупності = Інвестиція / Щорічна економія. Якщо господарство виконує лише один цикл заготівлі 100 га на рік, то окупність $\approx 20\,000 / 29\,910 \approx 0,66$ року.

ВИСНОВКИ

1. Розвиток кормової бази України у 2020–2024 роках характеризується як значними викликами, так і перспективами зростання: відчутні коливання виробництва через кліматичні та соціально-економічні чинники потребують системного підходу до розширення посівів кормових культур і впровадження сучасних технологій заготівлі, серед яких особливе значення має етап скошування як ключова операція, що визначає якість і поживну цінність кормів; саме використання сучасних технічних засобів, зокрема ротаційних і дискових косарок із плющильними пристроями, забезпечує зниження втрат поживних речовин, економію енергетичних ресурсів та підвищення продуктивності, що у комплексі сприятиме зміцненню кормової бази, ефективності тваринництва та конкурентоспроможності агропромислового сектору України.

2. Отримані в результаті аналітичних досліджень співвідношення для сили різання, рівномірності зрізу та продуктивності косарки створюють цілісну методичну базу для вибору оптимальних режимів роботи машини: вони наочно демонструють вплив діаметра стебел, частоти обертання ножа та швидкості руху агрегату на якість і енергетичну ефективність процесу; у поєднанні з експериментально визначеними параметрами такі моделі дають можливість розробляти карти режимів роботи косарки, що забезпечують чистий зріз, мінімальні енергетичні витрати й максимальну продуктивність, тим самим підвищуючи ефективність і надійність технології заготівлі стеблових кормів.

3. В результаті чисельного моделювання встановлено, що ефективність роботи косарки визначається поєднаним впливом частоти обертання ножа, швидкості руху агрегату та діаметра стебел трави: оптимальними виявилися режими при частоті обертання ножа 3500 об/хв, швидкості руху 2 м/с і середньому діаметрі стебла 5 мм, за яких забезпечується висока частка зрізаної трави (73 %), достатня продуктивність (93 м²/хв) та прийнятний рівень енергетичних витрат (2100 Дж), що підтверджує доцільність використання

такого підходу для підвищення ефективності та надійності процесу заготівлі стеблових кормів.

4. Експлуатація косарки вимагає суворого дотримання правил охорони праці та заходів безпеки, оскільки робота з ріжучими елементами на високих обертах у поєднанні зі складними умовами експлуатації створює підвищений рівень ризику; ефективна система захисту, що включає технічний контроль стану машини, використання засобів індивідуального захисту, організаційні заходи та готовність до дій у надзвичайних ситуаціях, є запорукою збереження життя та здоров'я працівників, а також забезпечення безперебійної та безпечної роботи агрегату.

5. Проведений розрахунок економічної ефективності довів, що впровадження удосконаленого робочого органа на косарці забезпечує суттєву економію витрат на паливо, оплату праці та технічне обслуговування, скорочує час виконання робіт і підвищує продуктивність агрегату; загальна економія при заготівлі 100 га становить близько 29,9 тис. грн, що забезпечує окупність інвестицій у модернізацію менш ніж за один сезон (0,66 роки), роблячи таке технічне удосконалення високоефективним та доцільним для впровадження у виробничих умовах.

Бібліографія

1. Машина для заготівлі та приготування кормів / За ред. В.І. Кравчука. – Дослідницьке, УкрНДІВПТ ім. Погорілого, 2009. – 136 с.
2. Машина для тваринництва та птахівництва / За ред. В.І. Кравчука, Ю.Ф. Мельника. – Дослідницьке, УкрНДІВПТ ім. Погорілого, 2009. – 207 с.
3. Романюха І.О., Дудін В.Ю. Курсове і дипломне проектування тваринницьких підприємств : навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.] / І.О. Романюха, В.Ю. Дудін; за ред. І.О. Романюхи. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2014. – 418 с.
4. Масло І., Фененко А. Молочному тваринництву – надійну техніку і енергозберігаючі технології / І. Масло, А. Фененко // Техніка АПК. – 2000. – № 4. – С. 2–5.
5. Кравчук В., Луценко М., Мечта М. Прогресивні технології заготівлі, приготування і роздавання кормів. – К. : Фенікс, 2008. – 104 с.
6. Ібатуллін І., Єрмакова Л. Якісний сінаж – початок ваших прибутків / І. Ібатуллін, Л. Єрмакова // Пропозиція. – 2022. – № 6. – С. 36–47.
7. Ібатуллін І., Єрмакова Л. Вчимося правильно готувати силос / І. Ібатуллін, Л. Єрмакова // Пропозиція. – 2001. – № 8. – С. 43–51.
8. ДСТУ 4397:2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.
9. Бойко І.Г., Гридасов В.І., Дзюба А.І. та ін. Практикум по машинах і обладнанню для тваринництва / За ред. О.П. Скорика, О.І. Фісяченка. – Харків, 2004. – 272 с.
10. Ясенецький В.А., Куліш В.С., Мечта М.П. та ін. Нова сільськогосподарська техніка / За ред. В.А. Ясенецького. – К. : Урожай, 1991. – 320 с.

11. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. – Київ : Аграрна наука, 2023. – 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
12. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Сова Н.А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми : колективна монографія / За заг. ред. Е.Б. Алієва. – Дніпро : ЛПА, 2022. – 192 с. ISBN 978-966-981-687-0
13. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 54, Nr. 1. – P. 95–104. – ISSN 2068–4215
14. Дудін В.Ю., Білоус І.М. Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2023. – № 4(123). – С. 71–77.
15. Дудін В.Ю., Білоус І.М. Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2024. – № 10(41), II. – С. 123–130.
16. Дудін В., Білоус І. Дослідження ефективності роботи дискового подрібнювача зерна // Вібрації в техніці та технологіях. – 2025. – № 1(116). – С. 56–63.
17. Білоус І.М. Обґрунтування доцільності підвищення ефективності подрібнення концентрованих кормів // Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». – 2022. – С. 9–11. ІМА АПВ НААН України.
18. Дудін В.Ю., Білоус І.М. Стенд для проведення експериментальних досліджень дискового подрібнювача зерна // Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування». – 2023. – С. 54–56. ПДАУ.
19. Дудін В.Ю., Білоус І.М. Дослідження міцності зерна кукурудзи з використанням чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM)

// Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки». – 2024. – С. 191–193. МОН України; НУБіП України.

20. Дудін В.Ю., Білоус І.М. Лабораторне обладнання для дослідження процесу визначення зусилля руйнування та деформації зерна // Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу». – 2024. – С. 170–172. ДДАЕУ.

21. Білоус І.М. Класифікація дискових подрібнювачів // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті», 9–10 квітня 2025 р., Рівне. – С. 8–10. НУВГП.

22. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця : ВНАУ, 2017. – № 4(87). – С. 91–100.

23. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М., Соломко І.В. Розробка конструктивно-технологічної схеми вібро роторної дробарки // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 1(69). – С. 125–129.

24. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М. Обґрунтування режимних параметрів процесу подрібнення зернової крохмалевмістної сировини спиртової промисловості // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 46. – С. 231–235.

25. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М. Експериментальна оцінка енергетичних параметрів вібророторної дробарки крохмаловмістної сировини спиртової промисловості // Вібрації в техніці та технологіях. – 2015. – № 3(79). – С. 133–136.

26. Солоня О.В., Білик Д.А. Вібраційні млини для помелу матеріалів сільськогосподарського виробництва // Вібрації в техніці і технологіях. – 2013. – № 2. – С. 196–199.

27. Гунько І.В., Холодюк О.В., Кузьменко В.Ф. Обґрунтування параметрів пристрою для подрібнення зерна при заготівлі кукурудзяного силосу // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця : ВНАУ, 2018. – № 3(102). – С. 28–36.

28. Грицун А.В., Бабин І.А., Сінгаєвський В.П. Оптимізація параметрів робочого процесу мобільного подрібнювача-роздавача кормів // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця : ВНАУ, 2016. – № 3(95). – С. 31–34.

29. Зінченко О.І., Салатенко В.Н., Білоножко М.А. Рослинництво : підручник / За ред. О.І. Зінченка. – К. : Агроосвіта, 2001. – 591 с.

30. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсів «Технологія механізованих робіт в рослинництві» та «Машиновикористання в рослинництві» для студентів спец. 208 «Агроінженерія» та 133 «Галузеве машинобудування» / Укл. В.М. Сало, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, П.Г. Лузан. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 170 с.

31. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування : підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва» / За ред. М.І. Черновола. Кн. 3 : Машини та обладнання для переробки зерна та насіння / П.В. Сисолін, М.М. Петренко, М.О. Свірень; за ред. М.І. Черновола. – К. : Фенікс, 2007. – 432 с.

32. Скошування як перший етап технології заготівлі трав'яного силосу // PÖTTINGER : веб-сайт. – Режим доступу: https://www.poettinger.at/uk_ua/Newsroom/Artikel/9633/.

Додатки

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Чисельне моделювання роторної косарки для заготівлі стеблових кормів

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-2-24
Колеснік Роман Анатолійович

Керівник: доктор філософії
Лупко Кристина Олегівна

Дніпро, 2025

Мета і задачі досліджень

2

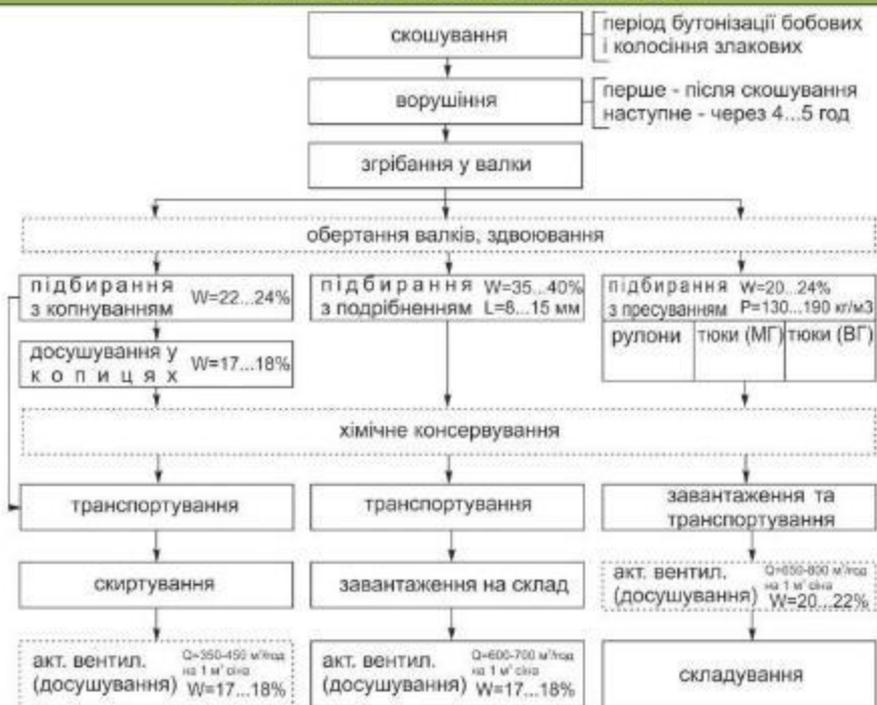
Метою є підвищення ефективності роботи роторної косарки шляхом створення чисельної моделі процесу її функціонування, яка дозволить дослідити взаємодію ножів з рослинною масою, оцінити навантаження на конструктивні елементи, визначити вплив кінематичних і технологічних параметрів на якість зрізу та енергоспоживання, а також обґрунтувати раціональні параметри машини для забезпечення надійної та економічної заготівлі стеблових кормів.

Завдання дослідження:

- провести огляд сучасного стану науково-технічних розробок у сфері конструкцій роторних косарок, проаналізувати основні напрями їх удосконалення та визначити актуальні проблеми, які потребують вирішення;
- виконати аналітичний аналіз кінематичних і динамічних параметрів роторної косарки, визначити залежності, що характеризують взаємодію ножів із стебловою масою, та обґрунтувати фактори, які найбільш суттєво впливають на якість зрізу й енергоспоживання;
- розробити методіку чисельного моделювання процесу роботи роторної косарки з використанням сучасних програмних комплексів, визначити граничні умови, параметри матеріалів та критерії оцінювання ефективності;
- провести серію чисельних експериментів для аналізу напружено-деформованого стану робочих органів, оцінки сил різання та навантажень, дослідити вплив конструктивно-технологічних параметрів на якість зрізу й енергетичні показники роботи косарки;
- розробити рекомендації щодо забезпечення безпечних умов експлуатації роторних косарок, оцінити потенційні ризики для обслуговуючого персоналу та передбачити заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях;
- виконати розрахунок економічної доцільності впровадження удосконаленої конструкції косарки, визначити показники собівартості заготівлі кормів, строк окупності та очікуваний економічний ефект від застосування нової машини у виробничих умовах.

Технологія заготівлі стеблових кормів

3



Технологія заготівлі сіна (Дудін В.Ю.)

Аналіз технічних засобів для схошування трав

4



Сегментно-пальцеві косарки



Ротатійні косарки



Дискові косарки



Косарки-плюшники

Аналітичні дослідження процесу роботи косарки

5

Визначення сили різання стебла трави

$$F \approx \frac{\sigma A l}{v} = \frac{\sigma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l}{\pi D n} = \frac{\sigma d^2 l}{4 D n}$$

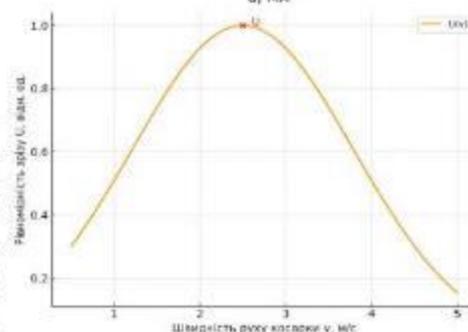
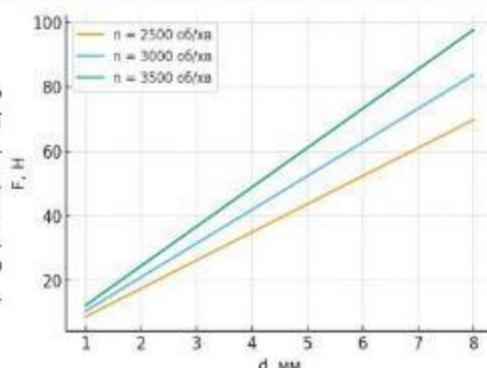
F – сила різання, Н; W – робота руйнування одного стебла під час зрізу, Дж; v – лінійна швидкість ріжучої кромки (тангенціальна швидкість ножа), м/с; d – діаметр стебла, м; σ – ефективна «границя міцності», Па (Н/м²); $A = \pi d^2/4$ – площа поперечного перерізу стебла, м²; l – характерна довжина руйнування (шлях, по якому відбувається руйнування під дією ножа), м; D – діаметр траєкторії руху кінця ножа (або радіус ріжучої кромки), м; n – частота обертання ножа, с⁻¹.

Розрахунок продуктивності косарки

$$Q = W V 60 \eta_f k_{stem}(n, V, d), \quad k_{stem} = 1 - (1 - p_{cut})^{N_{hit}}$$

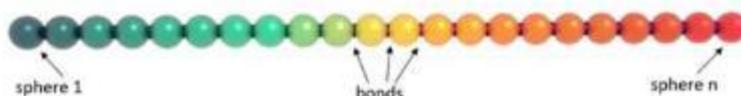
$$p_{cut}(v_{rel}, d) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(v_{rel} - v_0) + \beta(d - d_0))}$$

W – номінальна ширина захвату косарки, м; V – швидкість руху косарки, м/с; Q – продуктивність, м²/хв; η_f – коефіцієнт фактичного напрацювання; k – частка відрізаної трави, %; p_{cut} – імовірність успішного чистого зрізу одного стебла при одному контакті (0..1); N_{hit} – середня кількість контактів ножа з одним стеблом під час проходження (залежить від n і V); ρ_s – щільність стебел у травостой, шт/м² (якщо треба перерахувати енергію на площу або оцінити масовий потік матеріалу)

Залежність рівномірності зрізу U від швидкості руху косарки v

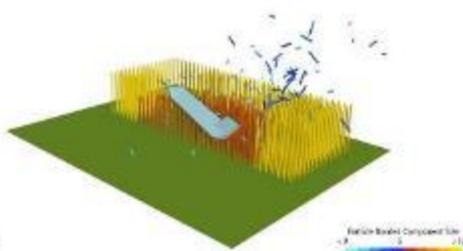
Методика чисельного моделювання

6



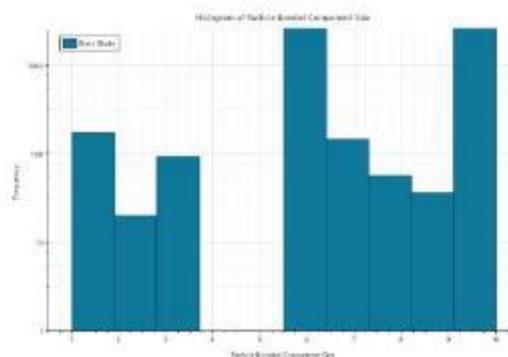
Візуалізація моделі трави

Simulation 1337 CPU
Total Grass Blades: 1215
Total Grass Blades Cut: 650



Сцена відображення візуалізації процесу

Для моделювання були обрані такі рівні факторів:
– частота обертання ножа n : 2500, 3000, 3500 об/хв;
– швидкість руху косарки V : 1,0; 1,5; 2,0 м/с;
– діаметр стебла трави d : 4,0; 5,0; 6,0 мм;

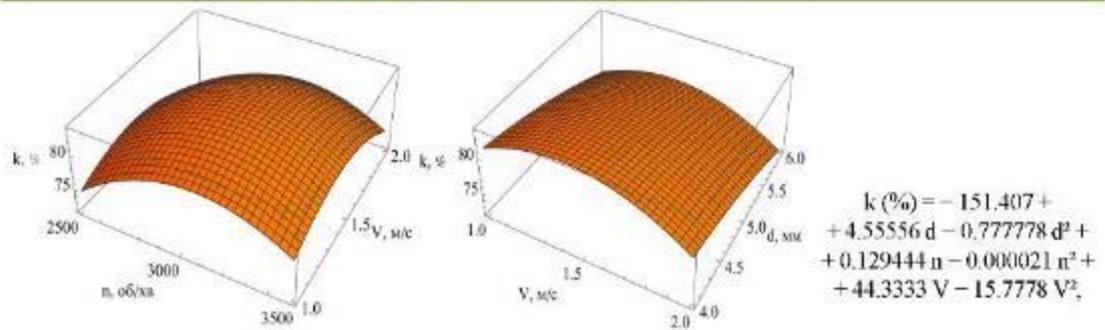


Гістограма розподілу довжини стебел трави після скошування протягом симуляції

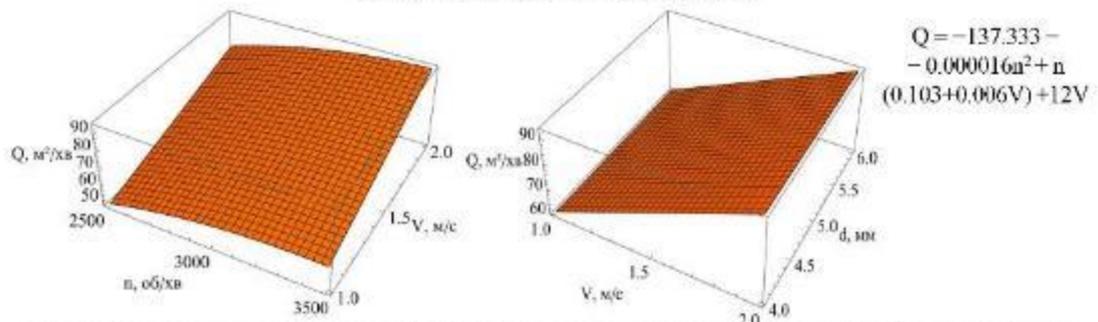
Критеріями оцінки ефективності були
– частки відрізаної трави k (%);
– витрати енергії E (Дж);
– продуктивність косарки Q (м²/хв).

Результати чисельного моделювання

7



Залежність частки зрізаної трави k (%) від частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметра стебла трави d (мм)



Залежність продуктивність косарки Q (м²/хв) від частоти обертання ножа n (об/хв), швидкості руху косарки V (м/с) та діаметра стебла трави d (мм)

Економічна ефективність удосконаленої косарки

8

Показник	Базовий варіант	Удосконалений варіант	Абсолютна зміна
Продуктивність Q , га/год	0,4360	0,5014	+0,0654 га/год
Час на 100 га, год	229,36	199,45	-29,91 год
Витрата палива, л (за кампанію 100 га)	2 752,3	2 393,4	-358,9 л
Вартість палива, грн (60,00 грн/л)	165 139,20	143 604,00	-21 535,20 грн
Витрати на оплату праці, грн (200 грн/год)	45 872,00	39 890,00	-5 982,00 грн
Витрати на техобслуговування, грн (80 грн/год)	18 348,80	15 955,60	-2 393,20 грн
Загальні операційні витрати, грн (100 га)	229 360,00	199 449,60	-29 910,40 грн
Економія на 1 га, грн	-	-	299,10 грн/га
Інвестиція (модернізація), грн	-	20 000,00	-
Термін окупності, роки (1×100 га/рік)	-	-	≈ 066 року

1. Розвиток кормової бази України у 2020–2024 роках характеризується як зривними високими, так і перспективними зростання: відсутні заповнення виробництва через кліматичні та соціально-економічні чинники спотворюють системного підходу до розширення посівів кормових культур і впровадження сучасних технологій заготівлі, серед яких особливе значення має етап експлуатації як ключова операція, що визначає якість і цінність кормів, саме використання сучасних технічних засобів, зокрема ротарійних і дискових косарок із плаваючими пристроями, забезпечує зниження витрат паливних ресурсів, економію енергетичних ресурсів та підвищення продуктивності, що у комплексі сприятиме збільшенню кормової бази, ефективності вирощування та конкурентоспроможності агропромислового сектору України.
2. Отримані в результаті аналітичних досліджень співвідношення для сили різання, рівномірності зрізу та продуктивності косарки створюють цілісну методичну базу для вибору оптимальних режимів роботи машини: вони наочно демонструють вплив діаметра стебел, частоти обертання ножа та швидкості руху агрегату на якість і енергетичну ефективність процесу; у поєднанні з експериментально визначеними параметрами такі моделі дають можливість розробити кінці режимів роботи косарки, що забезпечують чистий зріз, мінімальні енергетичні витрати й максимальну продуктивність, тим самим підвищуючи ефективність і надійність технології заготівлі стебляних кормів.
3. В результаті чисельного моделювання встановлено, що ефективність роботи косарки визначається послідовним впливом частоти обертання ножа, швидкості руху агрегату та діаметра стебел трави: оптимальним виявилися режими при частоті обертання ножа 3500 об/хв, швидкості руху 2 м/с і середньому діаметрі стебла 5 мм, за яких забезпечується така частка зрізаної трави (73 %), достатня продуктивність (93 м³/хв) та прийнятний рівень енергетичних витрат (2100 Дж), що підтверджує доцільність використання такого підходу для підвищення ефективності та надійності процесу заготівлі стебляних кормів.
4. Експлуатація косарки вимагає суворого дотримання правил експлуатації та заходів безпеки, оскільки робота з різними елементами на високих обертах у поєднанні зі складними умовами експлуатації створює підвищений рівень ризику; ефективним системам захисту, що включає технічний контроль стану машини, використання засобів індивідуального захисту, організаційні заходи та готовність до дій у надзвичайних ситуаціях, є заборужою збереження життя та здоров'я працівників, а також забезпечення безперебійної та безпечної роботи агрегату.
5. Проведений розрахунок економічної ефективності довів, що впровадження удосконаленого робочого органу на косарці забезпечує суттєву економію витрат на паливо, оплату праці та технічне обслуговування, економить час виконання робіт і підвищує продуктивність агрегату; загальна економія при заготівлі 100 га становить близько 29,9 тис. грн, що забезпечує окупність інвестицій у модернізацію менш ніж за один сезон (0,66 роки), роблячи таке технічне удосконалення високоефективним та доцільним для впровадження у виробничих умовах.