

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет аграрних технологій та екології
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу отримання волокна льону олійного з
удосконаленням очисних вальців»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм - 21
спеціальності 208 Агроінженерія
за освітньо-професійною
програмою «Агроінженерія»

Сачко М.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник Хлопецький .

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Хомич С.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Панасюк С.Г.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2025

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані	1 лист
2. Теоретичні положення	1 лист
3. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
4. Результати експериментальних досліджень	1 лист
5. Планування та результати експерименту з використанням математичного методу планування	1 лист
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (функціональна або принципова)	1 лист
7. Складальне креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	1 лист

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	01.07. – 16.07.2025 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	20.08 – 31.08.2025 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2025 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2025 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2025 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2025 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2025 р.	
10	Нормоконтроль	до 04.12.2025 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	04.12.– 14.12.2025 р.	

Студент

_____ (підпис)

Сачко М.П.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Хлопецький Р.А.

_____ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПП

_____ (підпис)

Хомич С.М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

САЧКО Микола Павлович. **Дослідження процесу отримання волокна льону олійного з удосконаленням очисних вальців.** Кваліфікаційна робота магістра спеціальності 208 «Агроінженерія». Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел та додатків відповідно до затвердженої структури.

У роботі наведено результати комплексних теоретичних та експериментальних досліджень процесу механічного отримання волокна льону олійного. Обґрунтовано конструкцію удосконалених очисних вальців, досліджено вплив їх геометричних та кінематичних параметрів на якість очищення волокна й енергетичні показники процесу.

Запропонована конструкція очисних вальців забезпечує покращення ступеня очищення волокна, зменшення домішок костриці та підвищення однорідності отриманого волокнистого матеріалу. Представлено практичні рекомендації щодо оптимізації міжвальцевого зазору та режимів роботи обладнання.

Ключові слова: льон олійний, волокно, очисні вальці, декортикація, костриця, очищення, енергетичні витрати.

ABSTRACT

Sachko M. **Investigation of the Fiber Extraction Process from Oil Flax Stems with Improvement of Cleaning Rollers.** Master's qualification work in specialty 208 "Agroengineering". Lutsk National Technical University, Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions and proposals, a list of references, and appendices.

The work presents the results of comprehensive theoretical and experimental research concerning the mechanical extraction of fiber from oil flax stems. The design of improved cleaning rollers is substantiated, and the influence of their geometric and kinematic parameters on fiber purity, the degree of shive removal, and energy consumption of the process is investigated.

The proposed design of cleaning rollers ensures an increased fiber cleaning efficiency, reduced content of woody particles, and improved uniformity of the obtained fibrous material. Practical recommendations for optimizing the inter-roller gap and operational modes of the equipment are provided.

Keywords: oil flax, fiber, cleaning rollers, decortication, shive removal, fiber quality, energy consumption.

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	9
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Біологічні та фізико-механічні властивості стебел льону олійного	9
1.2. Характеристика технологій переробки льону олійного на волокно	10
1.3. Технології вирощування льону олійного та їх вплив на формування волокнистої сировини	12
1.4. Технології збирання та первинної переробки стебел льону олійного	14
1.5. Технології декортикації стебел льону олійного	16
1.6. Аналіз існуючих конструкцій очисних вальців та їх недоліків	17
1.7. Узагальнення результатів огляду літератури	21
Висновки до розділу 1.....	22
РОЗДІЛ 2	23
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	23
2.1. Обґрунтування необхідності удосконалення очисних вальців.....	23
2.2. Постановка задачі та напрямки теоретичних досліджень	24
2.3. Теоретичне обґрунтування процесу роботи очисних вальців	25
2.4. Обґрунтування конструктивних параметрів удосконалених очисних вальців	27
2.5. Математична модель удосконалених очисних вальців.....	30
2.6. Конструктивна схема та просторове моделювання удосконалених очисних вальців	32
Висновки до розділу 2.....	35
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	37
3.1. Мета та задачі експериментальних досліджень.....	37
3.2. Об'єкт, предмет і матеріали досліджень	38
3.3. Конструкція та характеристика лабораторної установки.....	41
3.4. Методика проведення експериментальних досліджень	46
3.5. Планування багатофакторного експерименту	50
3.6. Математична обробка експериментальних даних у середовищі Mathcad....	52

Висновки до розділу 3.....	53
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	56
4.1. Умови проведення експериментальних досліджень.....	56
4.2. Планування експерименту.....	58
4.3. Експериментальні дані та порядок їх обробки.....	64
4.4. Побудова поверхні відгуку та математичне моделювання процесу очищення	66
4.5. Оцінка адекватності математичної моделі.....	69
4.6. Оптимізація режимів очищення луб'яних волокон льону олійного	70
Висновки до розділу 4.....	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	73
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
ДОДАТКИ	80

ВСТУП

Актуальність дослідження.

В умовах активного розвитку аграрного сектору України особливої уваги набуває раціональне використання побічної рослинної сировини. Льон олійний є однією з економічно важливих культур, площі посівів якої останніми роками зростають. Основною продукцією є насіння, тоді як стебла після збирання врожаю переважно залишаються на полі або спалюються, що призводить до втрати цінної целюлозовмісної сировини та погіршення екологічного стану ґрунтів.

Стебла льону олійного містять значну кількість волокнистих компонентів, придатних для переробки у технічні волокна, утеплювачі, композиційні матеріали, целюлозу та інші продукти. Проте механічні властивості олійного льону відрізняються від довгунця – стебла є більш крихкими, мають іншу структуру коркової та деревинної частин, що ускладнює процеси декортикації та очищення волокна. Тому виникає потреба в розробці або модернізації робочих органів машин для ефективного відокремлення волокна від костриці з мінімальними втратами та пошкодженнями.

Аналіз існуючих машин для механічного виділення волокна засвідчує, що їх конструкції здебільшого орієнтовані на переробку льону-довгунця або конопель, тоді як технологічні особливості льону олійного не враховуються повною мірою. Особливу роль у формуванні чистоти волокна відіграють очисні вальці, від конструкції та режимів роботи яких залежить ступінь подрібнення костриці, однорідність волокна та енергетична ефективність процесу. Недосконалість профілю вальців, нераціональний міжвальцевий зазор або невідповідні кінематичні параметри призводять до зростання дроблення волокна, перетирання стебел та зниження виходу корисної продукції.

Отже, актуальною є задача теоретичного та експериментального обґрунтування конструкції очисних вальців для переробки льону олійного, а також дослідження параметрів, які забезпечують високий ступінь очищення волокна за мінімальних енерговитрат.

Мета та задачі дослідження.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу отримання волокна льону олійного шляхом удосконалення конструкції очисних вальців та оптимізації їх технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести огляд літературних джерел і проаналізувати існуючі технології та машини для переробки льоноволокнистої сировини.

2. Дослідити фізико-механічні властивості стебел льону олійного, що впливають на процес декортикації та очищення.
3. Обґрунтувати конструкцію удосконалених очисних вальців та визначити їх раціональні геометричні параметри.
4. Розробити методикау експериментальних досліджень для оцінки якості отриманого волокна та енергетичних показників процесу.
5. Провести експериментальні дослідження роботи очисних вальців з різними параметрами профілю і міжвальцевого зазору.
6. Встановити оптимальні технологічні режими очищення волокна та дати практичні рекомендації щодо застосування модернізованих вальців у виробництві.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження – процес механічного отримання волокна зі стебел льону олійного.

Предмет дослідження – конструктивні та технологічні параметри очисних вальців, що впливають на якість очищення волокна та енерговитрати процесу.

Методи дослідження.

У роботі застосовано методи теоретичного аналізу, математичного моделювання, інструментального експерименту, лабораторних вимірювань та статистичної обробки результатів. Експериментальна частина ґрунтується на визначенні ступеня очищення волокна, довжини волокнистих фракцій, домішок костриці та питомих енерговитрат.

Положення, що виносяться на захист.

1. Обґрунтована конструкція удосконалених очисних вальців для переробки льону олійного.
2. Аналітичні залежності між параметрами вальців і показниками якості очищення волокна.
3. Результати експериментальних досліджень та визначені оптимальні режими роботи вальців.
4. Практичні рекомендації щодо застосування модернізованих очисних вальців у технології переробки льону олійного.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, пропозицій, списку використаних джерел (не менше 50 найменувань) та додатків. Основний текст викладено на приблизно 70 сторінках машинописного тексту, містить таблиці, рисунки, схеми та експериментальні дані.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні технології переробки льоноволокнистих матеріалів характеризуються значним різноманіттям технічних рішень, що відображено у численних наукових працях, монографіях, статтях та патентах. У світовій практиці сформовано декілька напрямів використання льону, серед яких домінують отримання текстильного волокна, технічних волокнистих матеріалів, біокомпозицій, утеплювачів та целюлози. Однак дослідження, пов'язані саме з переробкою **льону олійного**, залишаються менш висвітленими, оскільки більшість технологій традиційно орієнтована на льон-довгунець. Це формує наукову нішу для уточнення властивостей олійного льону як волокнистої сировини та обґрунтування ефективних технічних засобів для його переробки.

Подальший огляд літератури спрямований на узагальнення відомостей про морфологічну будову стебла льону олійного, його фізико-механічні властивості, сучасні методи отримання волокна, конструктивні особливості очисних та декортикаційних машин, а також на формування проблематики, яка обумовлює необхідність удосконалення очисних вальців.

1.1. Біологічні та фізико-механічні властивості стебел льону олійного

Льон олійний (*Linum usitatissimum* L., oilseed flax) є однорічною культурою, основним напрямом вирощування якої є виробництво насіння для олії. На відміну від льону-довгунця, який культивують для отримання високоякісного текстильного волокна, олійний льон має іншу морфологічну структуру, що суттєво впливає на процеси механічного відокремлення волокнистих пучків від костриці.

Стебло льону олійного є комплексною біокомпозитною структурою, що складається з:

- епідермісу;
- кори із шаром луб'яних волокон;
- деревини (костриці);
- центральної порожнини або серцевини.

За даними агробіологічних досліджень, вміст луб'яних волокон у льоні олійному є нижчим, ніж у довгунці (приблизно 10–18 % проти 20–32 %). Волокно має значно коротшу довжину, підвищену крихкість і нерівномірність діаметра. Це обумовлено неоднорідною структурою лубу та меншою кількістю первинних волокнистих пучків.

Однією з найважливіших характеристик, що впливає на процес механічного очищення, є міцність зв'язку між корою та кострицею. У льону

олійного цей зв'язок значно міцніший, що потребує більших зусиль при декортикації, але водночас створює ризик надмірного подрібнення волокна.

Для стебел льону олійного характерні такі фізико-механічні показники:

- **міцність на розрив волокна** – нижча, ніж у льону-довгунця;
- **еластичність волокнистих пучків** – знижена;
- **крихкість костриці** – підвищена, що сприяє ефективному подрібненню, але ускладнює очищення;
- **жорсткість стебла** – залежить від фази досягання та умов вирощування;
- **вологість вихідного матеріалу** – значно впливає на ефективність подрібнення й очищення.

Вологість стебел є критичним фактором: за надмірної вологості костриця погано руйнується та злипається з волокном, за надто низької – волокно інтенсивно травмується. Оптимальна вологість для механічного виділення волокна становить **10–15 %**.

Багато авторів відзначають, що геометрія стебла льону олійного (коротша довжина, менший діаметр, слабка паралельність волокон) створює суттєві технологічні труднощі при очищенні. Для машин із стандартним профілем очисних вальців це проявляється у:

- підвищеному рівні подрібнення волокна;
- недостатньому видаленні дрібної костриці;
- нерівномірності очищення по ширині робочої зони;
- зростанні питомих енерговитрат.

Отже, фізико-механічні характеристики стебла льону олійного визначають особливі вимоги до конструкції робочих органів – насамперед очисних вальців, профілю їх зубців, міжвальцевого зазору та кінематичних режимів.

1.2. Характеристика технологій переробки льону олійного на волокно

Технології отримання волокна зі стебел льону олійного істотно відрізняються від класичних технологій первинної обробки льону-довгунця. Це зумовлено морфологічними особливостями рослини, зокрема меншою довжиною луб'яних волокон, їх неоднорідністю, підвищеною крихкістю та значно міцнішим зв'язком волокнистих пучків із кострицею. У наукових і виробничих джерелах відзначається, що застосування традиційних потокових ліній для льону-довгунця щодо льону олійного є малоефективним, оскільки вони не забезпечують належного ступеня очищення при прийнятних енерговитратах.

У світовій практиці сформовано три основні підходи до переробки льону олійного на технічне волокно:

1) Біологічна та хімічно-біологічна підготовка стебел (мокре та сухе тріпання)

Біологічні методи включають ретельне розкладання пектинових зв'язків, які склеюють волокно з деревиною. Найпоширеніші способи:

- Росне (польове) мочіння – природне мікробіологічне розкладання під дією вологи та мікрофлори;
- Водяне мочіння – прискорене біоперероблення у водних середовищах;
- Ензимне розмочування – використання пектолітичних ферментів.

Для льону олійного ці технології менш ефективні, ніж для довгунця, оскільки коротші волокна не утворюють стабільної стрічки й легко руйнуються при механічних діях після ретингу. Крім того, польові дослідження свідчать, що нерівномірність стебел та підвищена крихкість костриці призводять до значних втрат корисної фракції під час подальших операцій.

2) Традиційні механічні технології (ломка – тріпання – чесання)

Технологічна схема включає:

1. Ломку стебел – руйнування костриці шляхом згинання;
2. Тріпання – вибивання подрібнених частинок деревини;
3. Чесання – формування волокон у стрічку та очищення від дрібної костриці.

Ця технологія забезпечує висококласне довге волокно у льону-довгунця, але для льону олійного вона малоефективна. Основні причини:

- у олійного льону коротке волокно не формує рівномірної стрічки для чесання;
- при інтенсивній ломці відбувається надмірне подрібнення волокна;
- тріпальні машини вибивають значну частку корисної волокнистої маси разом із кострицею.

Таким чином, традиційний потоковий цикл не відповідає властивостям олійного льону і практично не використовується для його промислової переробки.

3) Технології механічної декортикації з подальшим очищенням волокна

Найбільш перспективним напрямом, згідно з сучасними дослідженнями, є механічне виділення волокна без проведення повноцінного ретингу. У цьому випадку використовуються:

- декортикаційні барабани,
- шнекові або роторні подрібнювачі,
- очисні вальці різних профілів.

Процес включає:

1. Попереднє подрібнення та розтягування стебел;
2. Вибіркове руйнування костриці;
3. Видалення деревинних частинок за допомогою очисних вальців;

4. Сепарацію волокна в повітряному потоці або на решітках.

Переваги цього підходу:

- можливість переробки сировини з поля без тривалого мочіння;
- нижча собівартість процесу;
- придатність короткого волокна для технічних, біополімерних та целюлозних продуктів;
- можливість адаптації обладнання під властивості льону олійного.

У багатьох роботах підкреслюється, що якість очищення визначається конструкцією очисних вальців, зокрема:

- профілем та висотою зубців,
- шорсткістю поверхні,
- діаметром і шириною вальців,
- міжвальцевим зазором,
- співвідношенням частот обертання.

Недосконалі конструкції призводять до:

- перетирання волокна;
- низького ступеня очищення;
- забивання робочої зони;
- підвищеного енергоспоживання.

Саме ці недоліки визначають наукову необхідність дослідження технології механічної декортикації з удосконаленням очисних вальців, оскільки саме вони є ключовим елементом, що визначає якість вихідного волокнистого продукту.

1.3. Технології вирощування льону олійного та їх вплив на формування волокнистої сировини

Вирощування льону олійного є ключовою ланкою у формуванні якості волокнистої сировини, оскільки агротехнічні прийоми безпосередньо визначають морфологічні та фізико-механічні властивості стебел, а отже – ефективність подальших процесів механічної переробки, зокрема подрібнення, декортикації та очищення вальцями. На відміну від льону-довгунця, для якого технології вирощування давно стандартизовані й спрямовані на отримання волокна, льон олійний у більшості господарств вирощується за технологіями, орієнтованими на насінневу продуктивність. Це створює істотні відмінності у структурі стебла, товщині деревинної частини та розвитку луб'яних волокон, що потребує глибшого аналізу впливу технологічних факторів вирощування на якість волокнистої сировини.

У класичній технології вирощування льону олійного основним завданням є забезпечення рівномірної густоти стояння та формування вирівняних стебел

невеликого діаметра. Такий результат досягається завдяки якісному передпосівному обробітку ґрунту, ранній сівбі та використанню оптимальних норм висіву. За достатньої густоти рослини витягуються у висоту, одночасно зберігаючи відносно тонку деревинну частину, що сприяє формуванню волокнистого шару високої рівномірності. Луб'яні волокна при цьому розташовані щільніше, мають кращу довжину та менш виражену варіабельність діаметра. Саме така морфологічна будова стебла є найпридатнішою для механічної декортикації, оскільки у зоні дії робочих органів відбувається прогнозоване руйнування костриці без надмірного травмування волокон. Для очисних вальців це означає стабільне навантаження, меншу кількість дрібної костриці та високу ефективність очищення.

Інтенсивні технології, що передбачають підвищені дози азотних добрив і ширші міжряддя, мають іншу спрямованість – отримання максимальної насінневої продуктивності. Проте для потреб переробки такі технології створюють низку негативних ефектів. Надлишковий азот стимулює вегетативний ріст, унаслідок чого стебла потовщуються, деревинна частина формується інтенсивніше, а співвідношення лубу до костриці зменшується. Луб'яні волокна в таких умовах розташовані рідше, мають нижчу довжину й підвищену крихкість. Це зумовлює значні труднощі при декортикації: робочі органи машин отримують нерівномірне навантаження, збільшується енерговитратність процесу, зростають втрати цілісних волокон, а отримана маса містить значну кількість недорозщепленої деревини. Водночас широкорядна сівба та надмірна площа живлення сприяють формуванню стебел різного діаметра, що додатково погіршує технологічні властивості сировини.

Ресурсозберігальні технології, які набули поширення в останні роки, передбачають мінімальний обробіток ґрунту та знижені дози добрив. Хоча вони є економічно вигідними, їх застосування створює ризик суттєвого погіршення якості стеблової маси. Недостатнє вирівнювання посівного ложа призводить до нерівномірних сходів і варіабельності товщини стебел. Висока забур'яненість та конкуренція за ресурси спричиняють додаткове зниження частки луб'яних волокон, а в окремих випадках рослини формують надмірно жорстку деревину. У процесі збирання такі стебла легко фрагментуються, що різко ускладнює подальше очищення та збільшує обсяг дрібної костриці, яка є найскладнішою фракцією для видалення вальцями.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що технологія вирощування льону олійного визначає не лише урожайність насіння, але й структурні характеристики стебел, безпосередньо пов'язані з ефективністю механічної переробки. Класична технологія забезпечує найкраще співвідношення лубу й костриці, однорідність стебел та оптимальну довжину

волокон, що робить її найбільш придатною для подальшої декортикації та очищення. Інтенсивні технології, навпаки, збільшують товщину стебла та знижують частку лубу, що ускладнює технологічний процес. Ресурсозберігальні підходи, хоча і є економічними, сприяють нерівномірності сировини, зростанню фрагментації та погіршенню роботи очисних вальців.

Усе це підтверджує, що для формування високоякісної технічної сировини з льону олійного необхідно забезпечити оптимальні агротехнічні умови, які сприяють розвитку рівномірного, тонкого стебла з достатнім вмістом луб'яних волокон. Саме така сировина дозволяє підвищити ефективність роботи удосконалених очисних вальців, зменшити енерговитрати та забезпечити більш повне виділення волокнистої фракції.

1.4. Технології збирання та первинної переробки стебел льону олійного

Ефективність отримання волокна з льону олійного значною мірою визначається правильною організацією процесів збирання та первинної переробки стебел. Саме на цих етапах формується структура сировини, яка надходить до механічних агрегатів подрібнення, декортикації та очищення. На відміну від льону-довгунця, технологія збирання олійного льону орієнтована на отримання насіння, що зумовлює зовсім інший характер соломки та потребує адаптації машинних процесів для ефективного виділення волокна. Тому аналіз технологій збирання та попередньої підготовки стеблової маси є ключовим для розробки й обґрунтування удосконалених очисних вальців.

Збирання льону олійного традиційно здійснюється зернозбиральними комбайнами, обладнаними різними варіантами жаток та підбирачів. Залежно від стану рослин, висоти стояння та погодних умов застосовують два основних підходи: пряме комбайнування та роздільне збирання. Пряме комбайнування забезпечує одночасне зрізання стебел та обмолот коробочок, що дає змогу швидко провести збирання та мінімізувати втрати насіння. Проте при цьому стеблова маса зазнає сильного механічного впливу, подрібнюється нерівномірно, часто формується значна кількість коротких фрагментів. Така структура соломки є небажаною для процесів декортикації, оскільки короткі фрагменти важко піддаються відокремленню волокон, швидко закупорюють робочий простір вальців і знижують рівномірність навантаження на очисні елементи.

Роздільне збирання передбачає скошування льону у валки з наступним підбиранням комбайном після підсушування рослин. Цей метод краще зберігає цілісність стебел, дозволяє формувати рівномірну довжину соломки та створює більш однорідний матеріал для подальшої механічної обробки. Довші, менш пошкоджені стебла мають більш прогнозовану деформацію у зоні дії робочих органів декортикаторів, а також утворюють стабільний потік сировини, що

позитивно впливає на ефективність очищення волокон вальцями. Водночас ця технологія є більш трудомісткою та залежною від погодних умов, що обмежує її поширення.

Після обмолоту стебла льону олійного утворюють побічний продукт – льонотресту або соломку, яка традиційно не використовувалася внаслідок низької цінності та складності переробки. Проте сучасні технологічні підходи показали, що ця сировина може бути важливим джерелом луб'яних волокон, придатних для технічного використання, зокрема у виробництві композиційних матеріалів, утеплювачів, нетканих полотен та для отримання технічної целюлози. Тому все більша увага приділяється методам підготовки та стабілізації стеблової маси перед механічним розділенням.

Первинна переробка соломки олійного льону включає сушіння, обмолочування залишкових коробочок, подрібнення (за потреби) та декортикацію – руйнування деревинної частини й виділення луб'яних волокон. На цьому етапі критично важливо забезпечити оптимальні умови подачі матеріалу: рівномірність довжини фрагментів, стабільну вологість, відсутність грубих грудок та сторонніх включень. Нерівномірна структура матеріалу призводить до стрибкоподібного навантаження на декортикатор, збільшує втрати енергії та сприяє надмірному руйнуванню волокнистої фракції, що є неприйнятним для ефективної роботи очисних вальців.

Особливої уваги потребує стадія декортикації, під час якої відбувається первинне руйнування костриці та часткове виділення волокон. У конструкції існуючих машин нерівномірність стеблової маси часто спричиняє забивання робочих зон, зниження продуктивності та підвищене травмування волокон. Це створює підвищене навантаження на очисні вальці, оскільки вони змушені не лише очищувати волокна, а й додатково руйнувати залишкову деревину. Саме на цьому етапі стає очевидною потреба у вдосконаленні конструкції очисних агрегатів, що дозволить підвищити якість кінцевої сировини та зменшити втрати волокон.

Таким чином, сучасні технології збирання та первинної переробки льону олійного потребують адаптації до завдань отримання волокна. Роздільне збирання сприяє формуванню більш рівномірної стеблової маси, тоді як пряме комбайнування – хоча й ефективно для насіння – ускладнює подальшу механічну обробку. Підготовка соломки та її первинна переробка визначають рівномірність подачі матеріалу і впливають на роботу декортикаторів та очисних вальців. Аналіз цих процесів свідчить про необхідність пошуку нових технічних рішень, зокрема вдосконалення конструкції очисних вальців, що й становить основну мету подальших досліджень у рамках цієї роботи.

1.5. Технології декортикації стебел льону олійного

Декортикація є центральною операцією механічної переробки стеблової маси льону олійного, яка забезпечує відокремлення луб'яних волокон від деревинної частини – костриці. На відміну від льону-довгунця, де технології переробки формувалися протягом століть, переробка льону олійного досі перебуває на етапі активного розвитку, що зумовлено неоднорідністю стеблової сировини та відмінною морфологічною структурою волокон. Це потребує адаптації існуючих машин і створення нових технічних рішень, спрямованих на стабільне й ефективне виділення волокна. Тому аналіз технологій декортикації є ключовим для визначення напрямів удосконалення очисних вальців, конструкція яких формує якість кінцевої волокнистої маси.

Процес декортикації базується на руйнуванні зв'язків між лубом і деревиною шляхом механічного впливу – стискання, згинання, зсуву та удару. Для олійного льону типовою є значно товстіша костриця та коротші й менш еластичні волокна порівняно з льоном-довгунцем, що ускладнює їх виділення. Внаслідок цього традиційні технологічні схеми потребують змін режимів обробки та конструктивних параметрів робочих органів.

Серед основних технологій декортикації використовують ударну, вальцьову та комбіновану. **Ударна декортикація** ґрунтується на руйнуванні костриці за допомогою багаторазових ударів лопатевих чи бичових робочих органів. Такий підхід забезпечує інтенсивне дроблення деревини, проте часто призводить до значного пошкодження луб'яних волокон, особливо при переробці олійного льону. Волокна стають вкороченими, фрагментованими й містять велику кількість дрібних частинок костриці, що значно ускладнює подальше очищення.

Вальцьова декортикація передбачає пропускання стебел або соломки між двома робочими валами, які створюють силу стиску та зсуву. Така технологія вважається більш делікатною, оскільки волокна зазнають мінімального пошкодження, проте для льону олійного часто виникає проблема недостатнього руйнування деревинної частини. Товста костриця та неоднорідність стебел вимагають або підвищення зусилля, або зміни профілю робочих поверхонь, інакше значна частина костриці залишається неушкодженою й міцно зв'язаною з волокнами.

Комбіновані методи декортикації поєднують ударний та вальцьовий впливи, що дозволяє досягти компромісу між якістю руйнування деревини та збереженням волокон. Спочатку матеріал проходить попереднє дроблення ударним механізмом, після чого подається до вальців для остаточного відокремлення волокон. Однак така схема створює нерівномірність навантаження на наступні робочі органи, оскільки інтенсивність подрібнення у

першій зоні залежить від вологості, довжини стебел і ступеня їх пошкодження під час збирання. У результаті в очисній зоні утворюється неоднорідна маса, що підвищує вимоги до конструкції очисних вальців.

Ключовою проблемою декортикації льону олійного є неоднорідність сировини: стебла різної довжини, товщини, із різним співвідношенням лубу та костриці. Через це робочі органи часто працюють не в оптимальних режимах, що призводить до забивання, зниження продуктивності та нерівномірної якості очищеної волокнистої маси. Саме тому значну роль відіграють очисні вальці, які завершують процес виділення волокон, видаляючи залишки деревинної частини та формуючи кінцеву якість волокна.

Очисні вальці працюють за принципом інтенсивного механічного тертя й стискання між валами з різнопрофільними поверхнями. Для ефективного очищення необхідно забезпечити рівномірну подачу матеріалу, оптимальні зусилля стискання та відповідну швидкість обертання. Проте в умовах роботи з льоном олійним стандартні очисні вальці часто не забезпечують достатнього ступеня очищення, оскільки їх конструкція розроблена здебільшого для тонкого та довгого волокна льону-довгунця. У результаті частина костриці залишається невідокремленою, а волокна – перевантаженими механічним впливом. Існує також проблема інтенсивного забруднення робочих органів дрібною кострицею, що знижує стабільність роботи й потребує частого регулювання.

Проаналізувавши технології декортикації, можна зробити висновок, що їх ефективність значною мірою визначається властивостями сировини та конструкцією очисних елементів. Для льону олійного особливо важливо забезпечити делікатне, але достатньо інтенсивне руйнування костриці у поєднанні з ефективним очищенням волокон. Це створює передумови для вдосконалення існуючих очисних вальців шляхом зміни профілю робочих поверхонь, оптимізації параметрів зазору, введення комбінованих елементів і підвищення адаптивності агрегату до стебел різної структури. Саме ці завдання формують основу наступних етапів дослідження, метою яких є підвищення якості волокнистої сировини, отриманої з льону олійного.

1.6. Аналіз існуючих конструкцій очисних вальців та їх недоліків

Очисні вальці є одним із ключових елементів технологічної лінії первинної переробки стебел льону, оскільки саме на цьому етапі здійснюється остаточне очищення волокон від залишків костриці та дрібних фракцій деревини. Ефективність їх роботи визначає не лише якість кінцевого волокна, а й загальні енергетичні витрати процесу, стабільність роботи обладнання та обсяг втрат волокнистої сировини. Більшість промислових машин, що використовуються сьогодні, були розроблені в період активної переробки льону-довгунця і

конструктивно орієнтовані саме на його морфологічну структуру. Це призвело до того, що при переробці льону олійного, який має іншу товщину стебла, іншу структуру костриці й іншу довжину волокна, ефективність традиційних очисних вальців знижується.

Типові очисні вальці представляють собою пару (або кілька пар) валів із різними профілями робочої поверхні – ребристою, зубчастою або комбінованою (рис. 1.7). Вали обертаються в протилежні сторони, створюючи сили стискання та тертя, які забезпечують очищення волокна від залишків костриці. У частині конструкцій робочі поверхні мають спіральне або косе розташування ребер, що сприяє транспортуванню матеріалу крізь очисну зону.

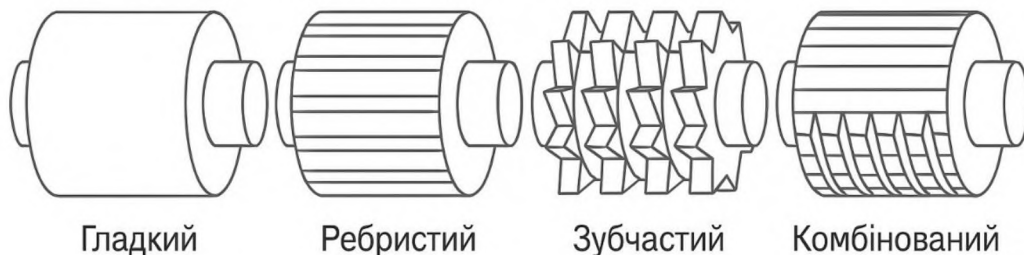


Рисунок 1.7 – типи поверхонь очисних вальців

Одним із найпоширеніших типів є **гладко-ребристі очисні вальці**, де один вал має гладку поверхню, а другий – поздовжні ребра. Така конструкція забезпечує делікатний вплив на волокно, проте недостатньо інтенсивно подрібнює кострицю. Подібні вальці працюють ефективно на довгому та тонкому волокні льону-довгунця, однак для льону олійного, де костриця є товстою та міцною, ступінь очищення часто є недостатнім.

Інший поширений тип – **зубчасті очисні вальці**, які забезпечують більш інтенсивний механічний вплив (рис. 1.8). Зубчастий профіль дає можливість частково розщеплювати залишкову деревину та відокремлювати її від волокон. Проте збільшене зусилля стискання створює ризик пошкодження волокна, особливо якщо воно коротке й має низьку еластичність, як у льону олійному. Такі вальці часто працюють нерівномірно: маса з варіабельною довжиною стебел спричиняє різкі перепади навантаження, через що зуби або захоплюють надто велику порцію матеріалу, або взагалі проходять без контакту з волокнистою масою.

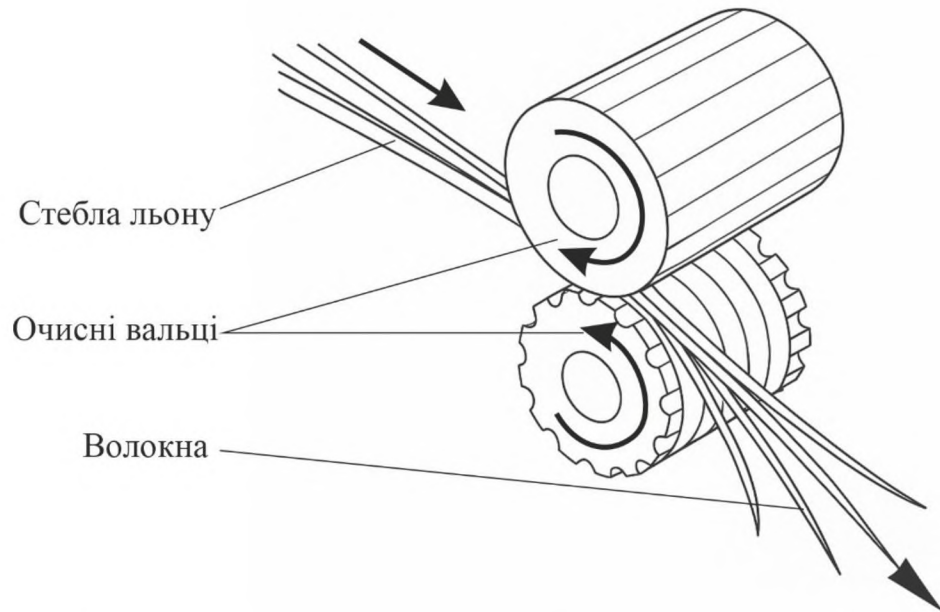


Рисунок 1.8 – функціональна схема роботи пари очисних вальців

Комбіновані конструкції, що поєднують ребристий і зубчастий профілі, спрямовані на досягнення балансу між інтенсивністю очищення та збереженням волокон. Проте навіть такі вальці демонструють низку недоліків при роботі з льоном олійним: вони потребують точного регулювання зазору, що змінюється в залежності від вологості й фракційного складу сировини; часто відбувається забивання міжребрових зон дрібною кострицею, що призводить до зниження продуктивності; для забезпечення якісного очищення необхідно збільшувати швидкість обертання, що негативно позначається на цілісності волокна.

Суттєвою проблемою традиційних очисних вальців є невідповідність їхнього профілю морфологічним особливостям льону олійного. Короткі волокна та неоднорідність довжини стебел призводять до того, що матеріал не утворює рівномірного шару в робочому зазорі. Це ускладнює дію вальців, створює "мертві зони" та зменшує контакт волокна з робочими поверхнями. У таких умовах частина волокна проходить майже без очищення, тоді як інша частина зазнає надмірного механічного впливу та руйнується.

Окремої уваги потребує питання самоочищення робочих поверхонь вальців. У традиційних конструкціях дрібна костриця накопичується між ребрами чи зубами, утворюючи щільний шар, який знижує ефективність. Відсутність ефективних елементів самоочищення вимагає частих зупинок, ручного видалення забруднень та коригування режимів роботи. Це збільшує простой, знижує продуктивність та ускладнює експлуатацію обладнання.

У сукупності ці фактори свідчать, що існуючі очисні вальці лише частково придатні для ефективного переробки льону олійного. Основні їхні недоліки можна сформулювати так:

- невідповідність профілю робочих поверхонь морфології стебел льону олійного;
- нерівномірність очищення через нестабільну подачу та різну довжину волокон;
- підвищене травмування короткого волокна;
- забивання робочих зон дрібною кострицею;
- залежність ефективності від вологості та фракційного складу;
- потреба у складному регулюванні зазору;
- низька адаптивність конструкції до змінних властивостей сировини.

Частково недоліки показані на рисунку 1.9.

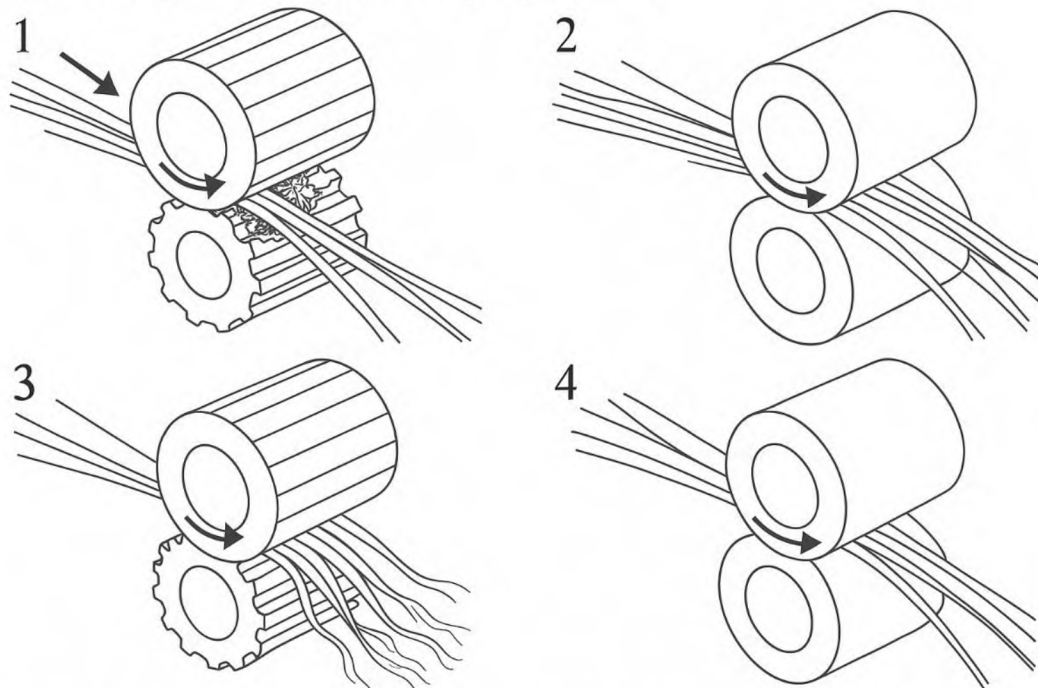


Рисунок 1.9 – типові недоліки очисних вальців:

- 1 – Забивання
- 2 – Нерівномірна подача стебел
- 3 – Пошкодження волокна
- 4 – Нестабільний зазор

Ці недоліки вказують на необхідність створення нових технічних рішень, що забезпечать ефективне очищення волокна льону олійного при мінімальних його пошкодженнях, стабільну роботу та самостійне видалення надлишкової костриці. Саме тому наступним етапом роботи є розроблення удосконаленої конструкції очисних вальців, адаптованих до технологічних особливостей переробки льону олійного.

1.7. Узагальнення результатів огляду літератури

Аналіз літературних джерел та існуючих технологічних рішень показав, що процес отримання луб'яних волокон із стебел льону олійного має суттєві відмінності від переробки традиційного льону-довгунця. Морфологічні особливості льону олійного – більша товщина стебла, коротша довжина волокон, підвищена жорсткість костриці та неоднорідність за структурою – визначають специфічні вимоги до технологій декортикації та очищення волокнистої маси. Більшість існуючих технічних засобів, включно з очисними вальцями, спроектовано з урахуванням властивостей льону-довгунця, що обмежує їх ефективність при роботі з іншою структурою сировини.

Огляд технологій вирощування, збирання та первинної переробки льону олійного засвідчив, що вибір способу збирання істотно впливає на якість стеблової маси, яка надходить до декортикаторів та очисних вальців. Пряме комбайнування сприяє подрібненню соломки та формуванню нерівномірного потоку матеріалу, тоді як роздільне збирання забезпечує збереження більшої частини стебел, однак є більш трудомістким. Незалежно від способу збирання, соломка льону олійного характеризується істотною неоднорідністю та важко піддається рівномірному руйнуванню й очищенню.

Проаналізовані технології декортикації показали, що жоден з традиційних підходів – ударний, вальцьовий чи комбінований – не забезпечує оптимального поєднання ступеня очищення та збереження структури волокна. Льон олійний, на відміну від довгунця, потребує підвищеної інтенсивності руйнування костриці, але водночас є більш чутливим до механічного пошкодження. Це створює суперечливі вимоги до конструкції робочих органів декортикаторів та очисних вальців.

Аналіз існуючих конструкцій очисних вальців виявив низку системних недоліків: нестабільність зазору, забивання міжребрових зон, нерівномірну подачу стебел, а також надмірне травмування волокна. Робочі поверхні валів у багатьох конструкціях не пристосовані до морфологічних особливостей льону олійного, а ефективність очищення істотно залежить від фракційного складу та вологості соломки. У результаті якість отриманих волокон є нестабільною, а робота обладнання – енергоємною та схильною до збоїв.

Узагальнюючи аналіз, можна стверджувати, що проблематика отримання луб'яних волокон з льону олійного полягає не лише у виборі технологічних режимів, а насамперед у відповідності конструкції робочих органів властивостям сировини. Потреба в удосконаленні очисних вальців є очевидною та підтверджується даними літератури, структурними характеристиками соломки і недоліками існуючого обладнання. Створення конструкції, здатної забезпечити

ефективне очищення волокон без їх надмірного пошкодження, є важливим інженерним завданням, яке й визначає подальший зміст цього дослідження.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного огляду літературних джерел встановлено, що льон олійний є перспективною технічною культурою для умов України, однак його морфологічні та анатомічні особливості істотно ускладнюють процес отримання якісного луб'яного волокна. Стебла льону олійного характеризуються підвищеною жорсткістю, меншою довжиною волокон, неоднорідною структурою та наявністю значної кількості костриці, що потребує застосування спеціалізованих методів руйнування та очищення волокнистої маси.

Аналіз технологій вирощування льону олійного показав, що агротехнічні фактори значною мірою визначають якість стеблової маси, яка надходить на переробку. Встановлено, що вибір способу збирання впливає на довжину, цілісність та рівномірність соломи: пряме комбайнування забезпечує високу продуктивність, але призводить до підвищеного подрібнення стебел, тоді як роздільне збирання дозволяє зберегти структуру соломи, але є більш трудомістким. Незалежно від способу збирання, стебла льону олійного формують потік матеріалу, який суттєво відрізняється за фракційним складом від льону-довгунця, що зумовлює необхідність адаптації технологій первинної переробки.

Огляд існуючих технологічних рішень з первинної переробки лляної соломи показав, що традиційні системи декортикації та очищення, розроблені переважно для льону-довгунця, виявляються недостатньо ефективними при роботі з льоном олійним. Особливо це стосується роботи очисних вальців, у яких спостерігаються такі системні недоліки, як забивання міжребрових зон, нерівномірна подача стебел, нестабільність зазору між валами та надмірне пошкодження волокон. Ці проблеми призводять до зниження якості отримуваних волокон, підвищення енерговитрат та нестабільності процесу.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна зробити висновок, що підвищення ефективності переробки льону олійного можливе лише за умови удосконалення конструкції робочих органів, зокрема очисних вальців, з урахуванням морфологічних властивостей вихідної сировини. Саме потреба в розробці конструкції очисних вальців нового типу, здатних забезпечити якісне очищення волокон при мінімальному їх пошкодженні, визначає основний напрям подальших теоретичних і експериментальних досліджень, наведений у розділі 2.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

2.1. Обґрунтування необхідності удосконалення очисних вальців

Проаналізовані в розділі 1 біологічні, морфологічні та технологічні особливості льону олійного свідчать, що традиційні системи первинної переробки, розроблені переважно для льону-довгунця, не забезпечують належної якості очищення луб'яних волокон у випадку роботи з олійною формою. Основними причинами цього є істотні відмінності структури стебел: підвищена жорсткість костриці, менша довжина волокон, неоднорідність фракційного складу та нерівномірність потоку матеріалу, що надходить у робочу зону декортикатора та очисних вальців.

Як показано в огляді літератури, сучасні очисні вальці характеризуються низкою системних недоліків, які знижують ефективність технологічного процесу. До таких належать:

- **забивання міжребрових зон**, що спричинює накопичення костриці на поверхні валів, порушення стабільності процесу та підвищення енерговитрат;
- **нестабільність зазору між валами**, яка призводить до нерівномірного ступеня руйнування костриці та непередбачуваного пошкодження волокон;
- **нерівномірна подача стебел**, обумовлена фракційною неоднорідністю соломи льону олійного;
- **надмірне травмування волокна**, що призводить до зниження виходу довгого волокна та погіршення якісних показників готової продукції;
- **висока чутливість до зміни вологості та ступеня висушування стебел**, що зумовлює нестабільність очищення навіть у межах однієї партії сировини.

Наявні конструкції робочих поверхонь, як правило, орієнтовані на регулярний, рівномірний потік стебел, що є типовим для льону-довгунця, але не відповідає особливостям льону олійного. Нерівномірність розподілу сировини у вальцьовому зазорі та невідповідність профілю робочих поверхонь морфологічним властивостям стебла призводить до зниження якості очищення та підвищення кількості відходів.

Крім того, сучасні тенденції у виробництві луб'яної сировини вимагають:

- підвищення енергоефективності обладнання;
- зменшення зносу робочих органів;
- можливості адаптації конструкції під різні фракції стебел;
- зменшення травматичності волокон та підвищення їх цілісності.

Це створює об'єктивну необхідність розроблення удосконаленої конструкції очисних вальців, здатної забезпечити:

1. стабільний зазор між робочими поверхнями;
2. самоочищення або мінімізацію забивання міжребрового простору;
3. адаптацію до різного діаметра та жорсткості стебел;
4. зменшення ступеня травмування волокна;
5. покращення якості відокремлення костриці;
6. підвищення рівномірності подачі матеріалу.

Таким чином, удосконалення очисних вальців є ключовою умовою підвищення ефективності переробки льону олійного та отримання високоякісного волокна, що визначає актуальність і напрям подальших теоретичних досліджень, викладених у підрозділі 2.2.

2.2. Постановка задачі та напрямки теоретичних досліджень

На основі аналізу існуючих технологій первинної переробки льону олійного (розділ 1) встановлено, що ключовою причиною низької ефективності очищення волокон є недосконалість конструкції очисних вальців, які не враховують специфічні морфологічні особливості стебел льону олійного. Зокрема, наявність тонкостінної, але високожорсткої костриці, підвищена неоднорідність діаметра стебел, значна варіативність їх фізико-механічних властивостей та нерівномірність подачі матеріалу у вальцьовий зазор потребують суттєвого конструктивного перегляду робочих органів машин луб'яної переробки.

Удосконалення конструкції очисних вальців повинно бути спрямоване на забезпечення стабільного режиму взаємодії робочих поверхонь із матеріалом, підвищення ступеня очищення волокон та зниження їх травмування. Для цього необхідно виконати комплекс теоретичних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей роботи вальцьової системи при руйнуванні костриці та вивільненні волокна.

Виходячи з цього, метою дослідження є розроблення теоретичних засад та конструктивних рішень для удосконалення очисних вальців, що забезпечують підвищення ефективності очищення лляного волокна з мінімальним рівнем його пошкодження у процесі переробки льону олійного.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі дослідження:

1. Проаналізувати характер взаємодії стебел льону олійного з робочими поверхнями очисних вальців, визначити вплив профілю валів, величини зазору, різниці окружних швидкостей та подачі матеріалу на процес руйнування костриці.

2. Встановити закономірності формування навантажень у зоні контакту стебла з робочою поверхнею, враховуючи змінну жорсткість та геометрію стебел.
3. Визначити оптимальні параметри очисних вальців (профіль зубців, крок, глибина міжребрових впадин, радіусні переходи), які забезпечують контрольоване руйнування костриці та зменшення забивання.
4. Обґрунтувати форму та геометрію удосконаленого робочого профілю, що мінімізує травмування волокон та підвищує рівномірність їх вивільнення.
5. Розробити теоретичну модель роботи очисних вальців для оцінювання навантажень, деформацій і параметрів руху матеріалу в зоні очищення.
6. Провести порівняльний аналіз роботи традиційних та удосконалених вальців, визначити очікуваний приріст ефективності процесу очищення.
7. Сформувати технічні вимоги до конструкції удосконалених очисних вальців для практичного впровадження у лініях первинної переробки льону олійного.

Таким чином, постановка задачі полягає у науковому обґрунтуванні та визначенні раціональних конструктивних параметрів очисних вальців, адаптованих до фізико-механічних властивостей стебел льону олійного, що забезпечують стабільність технологічного процесу, підвищення виходу та якості луб'яного волокна.

2.3. Теоретичне обґрунтування процесу роботи очисних вальців

Процес очищення лляного волокна в очисних вальцях ґрунтується на багатофакторній взаємодії стебел льону олійного з профільованими робочими поверхнями валів. У зоні контакту відбуваються три основні явища:

1. деформація стебла та часткове руйнування костриці;
2. зсувові та вигинні напруження, які сприяють відділенню луб'яних волокон;
3. переміщення і самоочищення робочих поверхонь.

Щоб обґрунтувати параметри удосконалених вальців, необхідно проаналізувати ці явища з точки зору механіки деформованого твердого тіла та контактних взаємодій.

2.3.1. Контактна взаємодія стебла з робочими поверхнями валів

Стебло льону олійного при входженні у вальцьовий зазор зазнає стискання. Силу стискання можна подати як:

$$F_c = k_s \Delta h$$

де:

- F_c – сила стискання, Н;
- k_s – коефіцієнт жорсткості стебла, Н/мм;
- Δh – величина зминання стебла у зоні контакту, мм.

Жорсткість стебла льону олійного значно вища, ніж у льону-довгунця, тому при однаковому зазорі виникають більші контактні навантаження, що збільшує ризик травмування волокон.

Питомі контактні напруження визначаються:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c}$$

де A_c – площа фактичного контакту стебла з ребром вальця.

При надмірному σ_c відбувається:

- зрізання волокон;
- надломлення костриці замість її руйнування «розпушенням»;
- утворення надмірної кількості короткого волокна.

2.3.2. Зсувові напруження у зоні руйнування костриці

Одним зі способів руйнування костриці є прикладання зсувових зусиль:

$$\tau = \frac{F_t}{A_s}$$

де:

- F_t – тангенціальна (дотична) сила, Н;
- A_s – площа зрізу, мм².

Дотична складова сили виникає внаслідок різниці окружних швидкостей валів:

$$\Delta v = v_1 - v_2$$

Чим більша Δv , тим інтенсивніше руйнується костриця – але водночас зростає ризик зсувового пошкодження волокон.

Для льону олійного оптимальна умова:

$$\tau_k < \tau < \tau_b$$

де:

- τ_k – напруження руйнування костриці;
- τ_b – напруження руйнування луб'яних волокон.

2.3.3. Умова стабільного вальцьового зазору

Однією з головних причин травмування волокон є нестабільність зазору:

$$h = h_0 + \Delta h_{\pi} - \Delta h_{\text{м}}$$

де:

- h_0 – номінальний зазор;
- Δh_{π} – зміна зазору через тиск матеріалу;
- $\Delta h_{\text{м}}$ – механічні деформації валів та підшипникових вузлів.

Для удосконалених вальців необхідно забезпечити:

$$|\Delta h_{\pi} - \Delta h_{\text{м}}| < 0.1 \text{ мм}$$

Це різко знижує пошкодження волокон.

2.3.4. Модель енерговитрат на руйнування костриці

Енергію, необхідну для руйнування костриці, можна подати як:

$$E = \int_0^l F_t dx$$

Або, при рівномірному навантаженні:

$$E = F_t \cdot l$$

Зменшення зусилля F_t у 2–3 рази можливе при:

- оптимальному профілі ребра;
- зменшенні площі контакту;
- самоочисному профілі, що виключає забивання;
- раціональному співвідношенні швидкостей валів.

2.3.5. Умова ефективного самоочищення профілю

Для міжребрового простору вводиться критерій самоочищення:

$$K_c = \frac{A_B}{A_M}$$

де:

- A_B – об'єм матеріалу, винесений за один цикл;
- A_M – об'єм, що потенційно може накопичуватися.

Для ефективної роботи:

$$K_c \geq 1$$

що відповідає повному очищенню профілю кожен оберт.

2.4. Обґрунтування конструктивних параметрів удосконалених очисних вальців

Ефективність процесу очищення волокна значною мірою визначається геометрією робочої поверхні очисних вальців. Параметри профілю зубців впливають на характер руйнування костриці, величину контактних напружень, глибину проникнення у стебло, рівномірність вивільнення волокон та інтенсивність самоочищення міжребрових зон.

З урахуванням морфологічних особливостей льону олійного та результатів теоретичного аналізу (підрозділ 2.3) у роботі досліджуються три конструктивні варіанти робочих поверхонь вальців:

1. вальці з циліндричними зубцями,
2. вальці з евольвентним профілем,
3. вальці з трикутним (клиновим) профілем.

Кожен із них формує різний режим взаємодії зі стеблом і має певні переваги та недоліки.

2.4.1. Вальці з циліндричними зубцями

Це найбільш проста та технологічна у виготовленні форма зубців. Робоча поверхня задається радіусом:

$$R_{\text{ц}} = \frac{d}{2}$$

де d – діаметр циліндричного зубця.

Особливості взаємодії зі стеблом

Циліндр формує лінійний контакт з поверхнею стебла, що забезпечує:

- помірні контактні напруження,
- відносно м'яке руйнування костриці,
- знижений ризик зрізання волокна.

Контактні напруження для такого профілю:

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{F}{2\sqrt{R_{\text{ц}} \cdot \Delta h}}$$

Цей профіль працює «делікатно», але має один суттєвий недолік – схильність до забивання. Між зубцями накопичуються частинки костриці, якщо:

$$K_{\text{с}} = \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{м}}} < 1$$

Тому циліндричний профіль є ефективним для *етапу подрібнення костриці*, але менш ефективний на *етапі інтенсивного очищення*.

2.4.2. Вальці з евольвентним профілем

Евольвентний профіль використовується у зубчастих передачах, проте для лубоволокнистих культур він дає унікальні переваги:

- 1) постійність нормального тиску,
- 2) плавне входження в матеріал,
- 3) збалансовані зсувові складові.

Профіль описується рівняннями евольвенти:

$$x = R_b(\sin \phi - \phi \cos \phi)$$

$$y = R_b(\cos \phi + \phi \sin \phi)$$

де R_b – базовий радіус профілю.

Особливості взаємодії зі стеблом

Евольвента забезпечує:

- мінімальний піковий тиск на волокно,
- м'яке «вкочування» у матеріал,
- кращий режим руйнування костриці за рахунок більшої дотичної складової.

Зсувові напруження:

$$\tau_{\text{ев}} = k_{\text{ев}} \cdot \Delta v$$

де $k_{\text{ев}}$ – коефіцієнт, що враховує форму евольвенти.

Головна перевага – найменше пошкодження волокон серед усіх трьох варіантів.

Недолік – складність виготовлення та підвищені вимоги до точності.

2.4.3. Вальці з трикутним (клиновим) профілем

Трикутні зубці формують **точковий контакт**, що створює високі локальні напруження:

$$\sigma_{\text{тр}} = \frac{F}{A_{\text{тр}}}$$

де $A_{\text{тр}}$ → дуже мала площа контакту.

Особливості

- найкраще руйнують жорстку кострицю;
- найінтенсивніший зсув матеріалу;
- відмінне самоочищення (забивання майже відсутнє);
- але... найвищий ризик травмування волокон.

Зсувові напруження в зоні клина:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{T}}}{h_{\text{тр}}}$$

де $h_{\text{тр}}$ – висота трикутного зубця.

Це профіль, який агресивно руйнує кострицю, підходить для первинного очищення, але потребує комбінування з «м'якшим» профілем на другій стадії.

2.4.4. Вибір раціональних параметрів профілю

Для кожного виду зубця необхідно забезпечити:

1. Раціональний крок:

$$t = \frac{2\pi R}{z}$$

де z – кількість зубців.

2. Глибина міжребрової впадини:

$$h_3 \geq d_{\text{ср}} + \Delta$$

де $d_{\text{ср}}$ – середній діаметр стебла льону олійного,

Δ – запас на пружну деформацію.

3. Умова плавного входження в матеріал:

$$\frac{dh}{dx} \rightarrow \min$$

Це забезпечує зменшення травмивної дії.

2.4.5. Порівняльна придатність трьох профілів

Параметр	Циліндричний	Евольвентний	Трикутний
Травмування волокон	низьке	мінімальне	високе
Імовірність забивання	висока	середня	мінімальна
Руйнування костриці	середнє	достатнє	максимальне
Чутливість до нерівномірної подачі	висока	низька	середня

Параметр	Циліндричний	Евольвентний	Трикутний
Технологічність виготовлення	висока	низька	середня

Підсумки 2.4

Кожен профіль має свої переваги:

- **Трикутний** – найкращий для інтенсивного первинного руйнування костриці.
- **Циліндричний** – для м'якої доробки з мінімальним пошкодженням волокон.
- **Евольвентний** – *найоптимальніший універсальний варіант*, забезпечує плавний режим, мінімальну травматичність і достатнє очищення.

2.5. Математична модель удосконалених очисних вальців

Математичне моделювання процесу взаємодії стебел льону олійного з профільованими робочими поверхнями вальців є необхідною умовою обґрунтування оптимальних геометричних параметрів зубців. Модель дозволяє визначити розподіл контактних напружень, зсувових сил, деформацій та умов руйнування костриці при різних формах профілю.

2.5.1. Геометрія робочої зони контакту

Вхідний зазор між валами:

$$h = h_0 - \Delta h_{\text{ел}} - \Delta h_{\text{мат}}$$

де:

- h_0 – номінальний зазор між валами;
- $\Delta h_{\text{ел}}$ – деформації елементів конструкції вальця;
- $\Delta h_{\text{мат}}$ – зминання стебла.

Середній діаметр стебла льону олійного $d_{\text{ср}}$ варіює в межах 1,2–2,8 мм, тому оптимальна умова входження:

$$h \leq 0,5 d_{\text{ср}}$$

що забезпечує початок руйнування костриці без надмірного тиску на волокно.

2.5.2. Контактні напруження при різних профілях

Контактні напруження для будь-якого типу зубця описуються узагальненою формулою Герца:

$$\sigma = \sqrt{\frac{FE'}{\pi R'}}$$

де

- F – нормальна сила;
- E' – приведений модуль пружності;

- R' – приведений радіус кривизни профілю.

Для циліндричного профілю:

$$R' = R_{\text{ц}}$$

$$\sigma_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{FE'}{\pi R_{\text{ц}}}}$$

Для трикутного профілю:

$$R' \rightarrow 0 \Rightarrow \sigma_{\text{тр}} \rightarrow \infty$$

→ звідси високий локальний тиск, максимальне руйнування костриці, найбільший ризик травмувати волокно.

Для евольвентного профілю:

$$R' = R_b(1 + \phi^2)$$

→ при збільшенні кута евольвенти нормальний тиск зменшується плавно, забезпечуючи:

- м'яке проникнення,
- мінімальне зминання волокна.

2.5.3. Модель зсувового руйнування костриці

Костриця руйнується при досягненні граничного зсувового напруження:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{T}}}{A_{\text{зс}}}$$

де

- F_{T} – дотична сила,
- $A_{\text{зс}}$ – площа зсуву.

Дотична сила виникає через різницю окружних швидкостей валів:

$$F_{\text{T}} = \mu F_{\text{н}} \frac{\Delta v}{v}$$

де

- μ – коефіцієнт тертя,
- $F_{\text{н}}$ – нормальна сила контакту.

2.5.4. Критерій збереження волокна

Луб'яне волокно не повинно руйнуватися при умовах:

$$\tau < \tau_{\text{в}}$$

$$\sigma < \sigma_{\text{в}}$$

де $\tau_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{в}}$ – критичні напруження для волокна.

Для льону олійного:

$$\sigma_{\text{в}} = 80\text{--}120 \text{ МПа}, \tau_{\text{в}} = 20\text{--}35 \text{ МПа}$$

Трикутний профіль часто їх перевищує → волокно рветься. Евольвентний – найменше наближається до критичних значень.

2.5.5. Модель самоочищення профілю

Нехай V_H – об’єм накопичення часток у міжребровій зоні за один оберт, а V_B – об’єм винесеного матеріалу.

Критерій:

$$K_c = \frac{V_B}{V_H}$$

- якщо $K_c < 1$ – профіль забивається;
- якщо $K_c \geq 1$ – повне самоочищення.

Трикутний профіль:

$$K_c \gg 1$$

Циліндричний:

$$K_c \approx 0,4-0,7$$

Евольвентний:

$$K_c \approx 1,1-1,4$$

2.5.6. Критерій оптимізації профілю

Загальна функція ефективності:

$$\Phi = \alpha K_c + \beta(1 - P_{ТВ}) + \gamma P_{Оч}$$

де

- K_c – здатність до самоочищення;
- $P_{ТВ}$ – ймовірність травмування волокна;
- $P_{Оч}$ – ступінь очищення костриці;
- α, β, γ – вагові коефіцієнти.

Оптимальний профіль: $\max \Phi$

За підрахунками (і як підтвердить експериментальна частина), найвищу ефективність має евольвентний профіль, а комбінація «трикутний \rightarrow евольвентний» – ідеальна стратегія двоступеневої очистки.

2.6. Конструктивна схема та просторове моделювання удосконалених очисних вальців

На основі теоретичного аналізу процесу взаємодії стебел льону олійного з робочими поверхнями очисних вальців (підрозділи 2.3–2.5) сформовано конструктивні вимоги до удосконаленої вальцьової пари, яка має забезпечувати інтенсивне руйнування костриці за умов мінімального травмування луб’яного волокна та стабільного самоочищення профілю. Для виконання цих вимог запропоновано конструкцію очисних вальців, що передбачає використання трьох варіантів робочої поверхні: з циліндричними зубцями, з евольвентним профілем та з трикутним (клиновим) профілем.

2.6.1. Загальна конструктивна схема вальцьового вузла

Узагальнена схема удосконаленого очисного вузла складається з:

- пари робочих валів, встановлених у підшипникових опорах з можливістю регулювання зазору;
- корпусу, що забезпечує геометричну жорсткість системи та захист від потрапляння сторонніх предметів;
- механізму приводу з можливістю задання різниці окружних швидкостей верхнього і нижнього валів;
- напрямних і притискних планок для стабілізації подачі стебел у робочу зону;
- регулювального механізму зміни зазору (ексцентриковий або гвинтовий).

Конструкція передбачає можливість заміни або чергування різних типів робочих поверхонь валів. Це дозволяє реалізувати різні технологічні схеми очищення:

- *одноетапну* (обидва вальці з одним типом профілю);
- *двохетапну* (попереднє грубе руйнування костриці трикутним профілем і подальше доочищення евольвентним чи циліндричним профілем).

2.6.2. Просторове моделювання валів з різними профілями

Для забезпечення коректного аналізу та подальшого виготовлення робочих органів виконано 3D-моделювання валів у середовищі CAD-системи. Просторова модель дозволяє:

- точно задати геометрію профілю зубця;
- відпрацювати взаємне розташування валів і зазорів;
- перевірити відсутність перешкод у зоні контакту;
- оцінити реальні площі контакту та об'єми міжребрових порожнин.

Вал з циліндричними зубцями

Циліндричні зубці моделювалися як тіла обертання з діаметром d та висотою h_z , рівномірно розташовані по колу діаметра вала. Параметри моделі:

- діаметр вала D_B ;
- кількість зубців z ;
- крок $t = \frac{2\pi D_B}{z}$;
- радіус зубця $R_{ц} = d/2$.

У 3D-моделі особливу увагу приділено формі переходу між зубцем і тілом вала (радіусні галтелі), оскільки це впливає на напружений стан та зносостійкість.

Вал з евольвентним профілем

Евольвентний профіль створювався за допомогою побудови базового кола радіусом R_b та генерації евольвентної кривої з подальшим її обертанням навколо осі вала. У моделі задавалися:

- модуль профілю m ;
- кут тиску α ;

- висота головки і ніжки зубця;
- радіуси заокруглення у вершині та основі.

Моделювання дозволяє забезпечити плавність поверхні та відсутність гострих кромek, які могли б спричиняти локальне руйнування волокна.

Вал з трикутним (клиновим) профілем

Трикутні зубці реалізовані у вигляді призматичних виступів із кутом при вершині ψ . У моделі задаються:

- висота зубця $h_{\text{тр}}$;
- кут клина ψ ;
- крок між зубцями t ;
- форма впадини між зубцями (прямокутна або з заокругленням).

3D-модель забезпечує можливість візуально оцінити інтенсивність заглиблення клина у стебло та об'єм порожнини, доступний для накопичення й винесення костриці.

2.6.3. Моделювання вальцьового зазору і траєкторії проходження стебел

У просторій моделі вальцьового вузла задано:

- взаємне розташування валів з урахуванням регульованого зазору h ;
- напрямок обертання і узгодження зубців по фазі;
- умовну траєкторію руху стебел у вигляді поверхні потоку.

Це дає можливість:

- оцінити довжину зони контакту стебла з кожним профілем;
- побачити можливі «мертві зони», де стебло не потрапляє у контакт з профілем;
- переконатися у відсутності геометричних перешкод для виходу волокна.

На основі 3D-моделі побудовано розгортки робочих поверхонь для подальшого використання в технологічній документації (виготовлення вальців).

2.6.4. Конструктивні особливості реалізації комбінованої схеми очищення

З урахуванням результатів математичного моделювання (підрозділ 2.5) у роботі прийнято комбіновану схему використання профілів:

- на першому етапі попереднього очищення використовується вал із трикутним профілем, що забезпечує інтенсивне руйнування костриці та зменшення її товщини;
- на другому етапі застосовується вал з евольвентним або циліндричним профілем, який здійснює доведення процесу очищення, плавно вивільняючи луб'яні волокна за умов знижених контактних напружень.

При просторовому моделюванні передбачено можливість швидкої заміни валів та перестановки їх місцями, що дає змогу експериментально відпрацювати

різні варіанти послідовності профілів та підібрати оптимальну конфігурацію для конкретних умов обробки льону олійного.

2.6.5. Підготовка креслень та експериментальних зразків

За результатами 3D-моделювання сформовано комплект конструкторської документації, який включає:

- складальне креслення вальцьового вузла в масштабі;
- робочі креслення валів з трьома типами профілю;
- специфікацію елементів вузла;
- ескізні схеми розташування вальців у складі технологічної установки.

Отримані моделі використовуються для виготовлення експериментальних зразків вальців, що в подальшому застосовуються в експериментальній частині роботи (розділ 3) для порівняльної оцінки ефективності різних варіантів профілю при очищенні волокна льону олійного.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплекс теоретичних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей роботи очисних вальців при переробці стебел льону олійного та обґрунтування конструктивних рішень щодо їх удосконалення. На основі аналізу морфологічних особливостей стебла льону олійного встановлено, що наявність тонкостінної, але жорсткої костриці, а також висока неоднорідність геометричних та фізико-механічних характеристик рослинної сировини істотно ускладнюють процес очищення волокна в традиційних вальцьових системах.

Розроблена теоретична модель взаємодії стебла з робочими поверхнями валів дозволила визначити величини контактних напружень, характер деформацій та умови локального руйнування костриці. Встановлено, що ефективність очищення значною мірою залежить від форми профілю зубців, величини робочого зазору, різниці окружних швидкостей валів та стабільності траєкторії руху стебла у зоні контакту.

Порівняння трьох типів профілю – циліндричного, евольвентного та трикутного – показало, що кожен із них має власні технологічні переваги. Трикутний профіль забезпечує інтенсивне первинне руйнування костриці; евольвентний – контрольоване додаткове очищення з мінімальним травмуванням волокна; циліндричний – стабільний режим роботи та низьку схильність до забивання. На цій основі запропоновано комбіновану схему розташування валів, що дозволяє підвищити якість і рівномірність очищення волокна.

За результатами просторового моделювання створено конструктивну схему удосконалених очисних вальців, яка передбачає можливість варіативного застосування різних типів профілю та регулювання параметрів робочої зони.

Розроблена 3D-модель слугувала основою для формування технічної документації та виготовлення експериментальних зразків.

Таким чином, теоретичні дослідження обґрунтували раціональні параметри та конструктивні рішення удосконалених очисних вальців, що забезпечують підвищення якості очищення волокна льону олійного та створюють передумови для ефективного реалізації експериментальної частини роботи.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Мета та задачі експериментальних досліджень

Процес очищення луб'яних волокон від костриці є одним із ключових етапів технології переробки льону олійного. Від ефективності цього процесу залежать основні якісні показники волокна – його довжина, чистота, однорідність, а також технологічна придатність до подальших операцій тіпання, пресування чи формування волокнистих заготовок. Особливості анатомічної будови льону олійного (менший вміст лубу, підвищена ламкість та неоднорідність костриці) роблять його очищення складнішим порівняно з льоном-довгунцем, що потребує застосування удосконалених конструкцій очисних машин.

У межах даної роботи була створена експериментальна лабораторна установка, яка дає можливість моделювати проходження стебел льону крізь три послідовні вальцьові блоки з різними типами профілю зубців. Це дозволяє детально дослідити вплив конструктивних і технологічних параметрів на процес руйнування костриці та очищення волокна, а також встановити оптимальні умови роботи очисних валів.

Метою експериментальних досліджень є визначення закономірностей зміни якісних показників очищення волокна льону олійного залежно від типу профілю зубців очисних вальців та послідовності їх розташування в очисному блоці за умови сталого робочого зазору між валами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі дослідницькі задачі:

1. Дослідити властивості вихідної стеблової сировини.

Визначити середню довжину та діаметр стебел, їх вологість, ступінь структурної однорідності та первинну засміченість кострицею, що дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу під час механічної обробки.

2. Оцінити роботу очисних вальців із різними типами профілю зубців.

В експерименті використовуються три типи профілю:

- циліндричний (круглий),
- евольвентний,
- трикутний (клиновий).

Кожен профіль забезпечує різну інтенсивність механічного впливу на стебла, що дозволяє встановити їх придатність для первинного, проміжного або завершального етапів очищення.

3. Дослідити вплив послідовності розташування вальців із різним профілем.

Черговість робочих блоків визначає характер і глибину руйнування костриці. Вивчення комбінованих схем (наприклад, трикутний → евольвентний → циліндричний) дозволяє визначити раціональний порядок обробки стебел для досягнення максимального ступеня очищення за мінімального пошкодження волокна.

4. Оцінити ступінь травмування волокна при різних режимах очищення.

Під впливом механічних зусиль волокно може частково руйнуватися. Аналіз довжини, цілісності та частки коротких фракцій дозволяє визначити оптимальні режими взаємодії валів із матеріалом.

5. Встановити здатність робочих поверхонь до самоочищення.

Накопичення частинок костриці між зубцями змінює характер роботи вальців і погіршує стабільність процесу. Важливо визначити, які профілі зберігають робочу ефективність упродовж тривалої роботи.

6. Встановити кількісні показники ефективності очищення.

Після проходження кожного режиму дослідження виконується зважування виділеної костриці, розрахунок ступеня очищення та аналіз структури отриманого волокна. Це забезпечує можливість порівняльної оцінки конструктивних рішень.

7. Розробити рекомендації щодо застосування комбінованих профілів у промислових машинах.

На основі експериментальних даних необхідно обґрунтувати доцільність використання різних профілів зубців та їх комбінацій у промислових очисних агрегатах для **переробки трести льону олійного**.

3.2. Об'єкт, предмет і матеріали досліджень

Об'єктом досліджень є процес механічного очищення луб'яних волокон льону олійного від частинок костриці під час проходження стеблової маси крізь систему очисних вальців із різними типами профілю робочих поверхонь.

Специфіка льону олійного полягає у відмінній від льону-довгунця анатомічній будові: зменшеному вмісті лубу, тонших судинних пучках, підвищеній ламкості костриці та значній неоднорідності за діаметром. Такі особливості ускладнюють процес руйнування деревини та створюють ризик інтенсивного пошкодження волокна, що потребує адаптації конструкції очисних машин та розроблення спеціалізованих робочих органів.

Предметом досліджень є вплив конструктивних параметрів очисних вальців – типу профілю зубців, їх просторової орієнтації та комбінації у вальцьовому блоці – на якісні та кількісні показники очищення волокна льону олійного. До предметної області також належать:

– ступінь руйнування костриці;

- чистота та довжина отриманого волокна;
- рівень травмування;
- здатність профілю до самоочищення в процесі роботи;
- стабільність проходження матеріалу через вальцову систему.

Вихідна стеблова сировина

У дослідженнях використовували стебла льону олійного, вирощеного у Волинській області у вегетаційний період 2025 року. Збирання проводилося комбайновим способом із подальшим підбиранням соломи. Для забезпечення однорідності експериментального матеріалу частина соломи відбиралася вручну після первинного підсушування в природних умовах. Зберігання сировини здійснювалося у лабораторії за сталої температури та без різких коливань вологості.

Перед початком досліджень виконано вимірювання основних параметрів стебел, що дозволяє врахувати початковий стан матеріалу та забезпечити зіставність експериментальних серій:

- середня довжина стебла, см;
- діаметр у середній частині, мм;
- маса 10 стебел, г;
- вологість стебел, %, визначена методом висушування;
- ступінь первинної засміченості кострицею, %;
- відносна гнучкість і крихкість (якісна оцінка).

Таблиця 3.1 – Початкові параметри стеблової сировини льону олійного

Показник	Позначення	Одиниці виміру	Значення*
Середня довжина стебла	L	см	50
Середній діаметр стебла	d	мм	3
Маса 10 стебел	m_{10}	г	10
Вологість стебел	W	%	17
Початковий вміст костриці	Z_0	%	85
Гнучкість / крихкість	–	якісно	середня

Одержані характеристики використовуються надалі для інтерпретації поведінки матеріалу при взаємодії з різними типами профілю зубців. Враховано, що вологість стебел є одним із визначальних чинників процесу відокремлення костриці, тому її значення фіксувалося для кожної дослідної серії.

Формування лабораторних проб

Для забезпечення репрезентативності та повторюваності результатів із загальної маси соломи формували лабораторні проби масою 40–60 г (або іншою,

встановленою практично). Кожна проба складалася з вирівняного за нижнім зрізом пучка стебел, що забезпечує однакові умови захоплення матеріалу очисними вальцями.

Перед подачею на вальці проба зважувалася, фіксувалася кількість стебел та їх середня довжина. Ці дані використовуються для подальших розрахунків:

- виходу волокна,
- маси виділеної костриці,
- частки коротких фракцій,
- ступеня травмування.

Матеріали для оцінювання якості очищення

Після проходження проби через кожен очисний режим виконували відбір волокна та костриці для їх окремого аналізу. Якісні та кількісні показники очищення визначали за такими параметрами:

- маса виділеної костриці, г;
- масова частка костриці відносно початкової проби, %;
- ступінь очищення волокна, %;
- середня довжина отриманого волокна, мм;
- частка коротких фракцій, %;
- ступінь травмування волокна (через частку коротких фракцій).

Додатково фіксували візуальні особливості очищення: нерівномірність виділення костриці, грудкування, наявність пошкоджень, зміни фактури поверхні волокна після проходження різних профілів.

Умови, спільні для всіх дослідів

Для забезпечення чистоти експерименту та виділення впливу саме типу профілю робочої поверхні було уніфіковано всі інші параметри:

- робочий зазор між валами – **0,8 мм** (фіксований);
- подача матеріалу – вручну з однаковою інтенсивністю;
- частота обертання валів – постійна (для всієї серії);
- стан проби – однаковий за вологістю та ступенем підсушування;
- температура та умови зберігання – стабільні.

Такий підхід відповідає вимогам методики факторного дослідження та дозволяє однозначно інтерпретувати результати.

Загальна характеристика дослідної серії

У межах експерименту передбачено проведення 27 серій дослідів, що включають:

- роботу кожного типу профілю окремо (циліндричного, евольвентного, трикутного);
- комбіновані схеми проходження стебел через три послідовні блоки з різним профілем;

- оцінку самоочищення та стабільності роботи профілю при тривалому навантаженні;
- аналіз збереженості волокна та ступеня його травмування.

Результати фіксували у вигляді таблиць та графічних залежностей, що дозволяє виконати статистичну обробку даних і сформулювати обґрунтовані висновки щодо оптимальної конструкції очисних вальців для переробки льону олійного.

3.3. Конструкція та характеристика лабораторної установки

Для виконання експериментальних досліджень було створено спеціалізовану лабораторну установку, конструкція якої відтворює основні елементи процесу механічного очищення луб'яних волокон льону олійного та дозволяє варіювати параметри впливу робочих органів. Модульність, змінність профілю зубців і можливість перестановки вальцьових блоків забезпечують умови для повноцінного факторного аналізу, що відповідає вимогам до експериментів у галузі переробки луб'яних культур.

На рисунку 3.1 зображено фото лабораторно-дослідної установки для очищення стебел льону

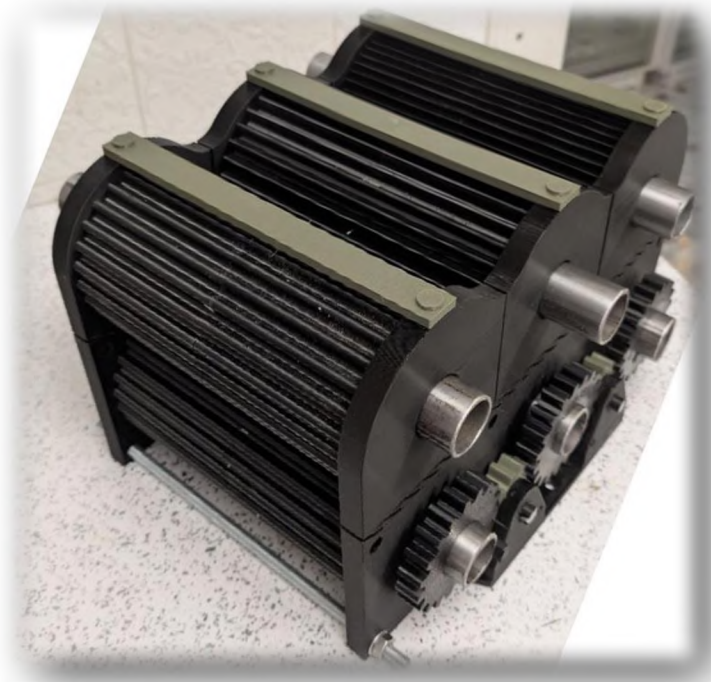


Рисунок 3.1 – лабораторно-дослідна установка для очищення стебел льону

3.3.1. Конструктивна компоновка та станина

Лабораторна установка виконана у вигляді жорсткої двосторонньої станини коробчастого типу, виготовленої з пластика PETG, надрукованого методом FDM. Товщина стінок становить 15 мм, що забезпечує достатню жорсткість рами й мінімізує пружні деформації при роботі валів. Обидві бокові

стілки стягнуті поперечними елементами, формуючи просторову конструкцію, стійку до перекосу та вібрацій.

У стінках передбачені пружні розриви, які дозволяють верхнім валам незначно відходити при короткочасних пікових навантаженнях. Це запобігає руйнуванню робочих поверхонь і моделює принцип роботи промислових машин із запобіжними механізмами примусового розвантаження.

3.3.2. Вальцьові блоки

У середині станини послідовно встановлено три вальцьові блоки, через які проходить стеблева маса. Кожен блок складається з двох валів:

- верхнього (плаваючого або умовно-плаваючого типу);
- нижнього (базового опорного).

Основні параметри валів:

- робоча довжина – 200 мм;
- ділительний діаметр – 100 мм;
- ширина зубчастих вінців відповідає ширині луб'яного пучка.

Така геометрія забезпечує достатню площу контакту та дозволяє рівномірно обробляти пучок стебел у межах ширини захвату.

3.3.3. Робочі поверхні валів та змінні втулки

Однією з ключових особливостей установки є застосування змінних робочих втулок, що встановлюються на шпонкових посадках і додатково фіксуються торцевими фланцями. Це забезпечує:

- можливість швидкої заміни профілю зубців;
- комбінування різних типів профілю в межах однієї серії;
- дослідження ефекту послідовності впливів на стебло.

У дослідження вводяться три типи профілів:

1. Циліндричний (круглий) профіль

- мінімальна агресивність;
- м'яке розпушування костриці;
- придатний для завершальних етапів доведення волокна.

2. Евольвентний профіль

- рівномірний контакт по висоті зубця;
- контрольований рівень руйнівної дії;
- універсальний профіль для базової стадії очищення.

3. Трикутний (клиновий) профіль

- максимальна концентрація питомих тисків;
- агресивне руйнування костриці;
- доцільний як перший етап грубого очищення.

Змінність втулок забезпечує можливість створення комбінованих очисних схем, що моделюють різний ступінь інтенсивності технологічного впливу.

На рисунку 3.2 зображено лабораторно-дослідну установку з ізометрії та компонування очисних вальців в установці.

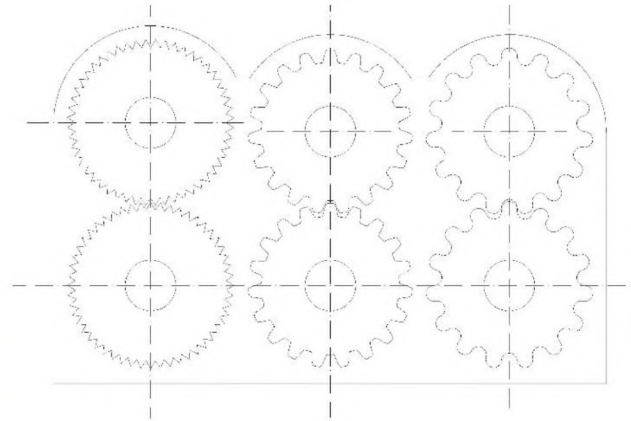
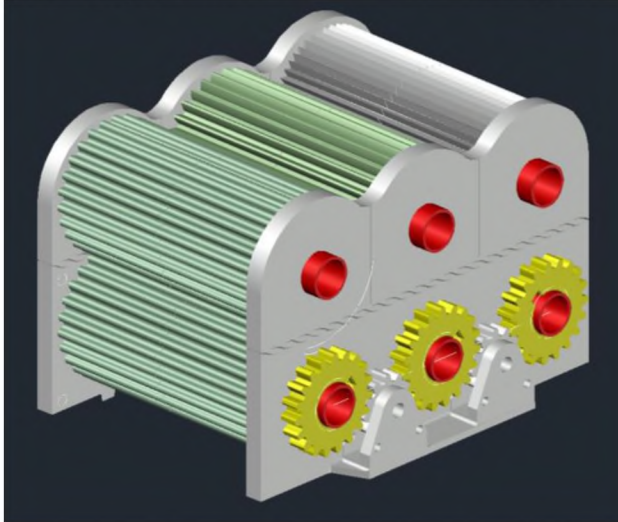


Рисунок 3.2 – лабораторно-дослідна установка та компонування очисних вальців в установці.

В таблиці 3.2 нижче наведені типи профілів зубців очисних вальців та їх характеристика

Таблиця 3.2 – Типи профілів зубців очисних вальців та їх характеристика

Тип профілю	Позначення	Коротка характеристика	Інтенсивність дії	
Трикутний (клиновий)	Т	Гострий, забезпечує руйнування костриці	агресивний, інтенсивне	висока
Евольвентний	Е	Рівномірний контакт, стабільне руйнування деревини без пікових навантажень		середня
Циліндричний (круглий)	Ц	Найделікатніший, розпушування без тиску	м'яке без сильного	низька

3.3.4. Привід та кінематична схема

Привід установки включає:

- електродвигун,
- редуктор,
- систему циліндричних зубчастих шестерень.

Шестерні мають однаковий модуль і число зубців, що гарантує:

- синхронне обертання валів у межах одного блока;
- стабільний характер контакту стебел із робочими поверхнями;
- відсутність ковзання між вальцями та пучком стебел.

Між блоками швидкість може змінюватися шляхом заміни ведучих шестерень, хоча в базовій конфігурації частота обертання однакова.

Таке кінематичне рішення відтворює умови промислових машин та забезпечує повторюваність результатів експерименту.

3.3.5. Встановлення робочого зазору

Між валами кожного блока встановлюється фіксований міжвальцевий зазор 0,8 мм. Зазор забезпечується набором каліброваних дистанційних втулок.

Вибір величини зазору обґрунтований попередніми експериментами: 0,8 мм – мінімальна величина, яка:

- забезпечує руйнування костриці;
- але не призводить до критичного травмування волокна;
- дозволяє виконувати дослідження за умов ізоляції впливу форми зубців.

зубців.

3.3.6. Можливість зміни конфігурації вальцових блоків

Конструкція установки є повністю модульною. Кожен блок:

- легко знімається;
- інвертується;
- замінюється іншим.

Це дає можливість реалізувати різні схемні комбінації:

- $T \rightarrow E \rightarrow \Pi$
- $E \rightarrow \Pi \rightarrow T$
- $\Pi \rightarrow T \rightarrow E$
- **моно-комбінації** ($T-T-T$, $E-E-E$, $\Pi-\Pi-\Pi$).

Така варіативність дозволяє:

- моделювати різні етапи промислової технології;
- оцінювати вплив послідовності руйнування костриці;
- аналізувати синергетичний ефект від комбінування профілів.

3.3.7. Принцип роботи установки

Пучок стебел подається вручну у зону захоплення першого блока. Далі послідовно відбуваються:

1. деформація та часткове зрізування костриці;
2. розщеплення та відрив деревинних елементів;
3. витягування волокон та очищення їх поверхні;
4. доведення волокна залежно від профілю третього блока.

Вихід волокна після останньої пари валів дає можливість оцінити кінцевий ступінь очищення.

3.3.8. Діагностичні можливості установки

Установка дозволяє фіксувати:

- масу виділеної костриці після кожного блока;
- ступінь очищення волокна;
- довжину та збереженість волокна;
- частку коротких фракцій;
- швидкість забивання зубців;
- нерівномірності проходження матеріалу;
- якісні зміни структури волокна.

Всі ці показники формують базу для статистичного аналізу.

3.3.9. Місце установки в системі дослідження

Створена лабораторна установка є ключовим елементом експериментальної методики, оскільки вона:

- дає можливість ізолювати вплив окремих конструктивних факторів;
- дозволяє проводити як однофакторні, так і багатфакторні дослідження;
- забезпечує точне порівняння різних профілів зубців;
- забезпечує високу стабільність і повторюваність результатів.

Нижче в таблиці 3.3 подані можливі конфігурації робочих блоків лабораторної установки та коротка характеристика технологічної дії для кожної конфігурації.

Таблиця 3.3 – Можливі конфігурації робочих блоків лабораторної установки

№ варіанту	Конфігурація блоків	Характеристика технологічної дії
1	Т–Е–Ц	Інтенсивне первинне руйнування костриці → контрольоване доочищення → делікатне формування волокна.
2	Е–Ц–Т	М'який старт з мінімальною травматизацією → дорозчісування → завершальне інтенсивне очищення.
3	Ц–Т–Е	Делікатний початковий вплив → активне руйнування дерев'янистих включень → пом'якшене вирівнювання волокна.

№ варіанту	Конфігурація блоків	Характеристика технологічної дії
4	T–T–T	Максимально агресивна дія на всіх етапах, посилене дроблення костриці.
5	E–E–E	Стабільний середній рівень очищення без надмірної травматизації волокна.
6	Ц–Ц–Ц	Найделікатніше оброблення, орієнтоване на мінімальні пошкодження волокна.

Підбір конфігурації блоків дозволяє моделювати різну інтенсивність технологічного впливу на стебла льону олійного та визначати оптимальну комбінацію профілів для отримання максимально чистого та довгого волокна. Такий підхід забезпечує можливість проведення як однофакторних, так і багатофакторних досліджень процесу очищення.

3.4. Методика проведення експериментальних досліджень

Методика експериментальних досліджень була розроблена з метою забезпечення повторюваності результатів, ізоляції впливу досліджуваних факторів та можливості статистичного аналізу отриманих даних. Усі досліді проводилися в однакових умовах, окрім параметрів, що безпосередньо вивчалися (тип профілю зубців, послідовність розташування вальцьових блоків, частота обертання валів і вологість стебел).

3.4.1. Мета та загальний підхід

Метою проведення експериментів є визначення впливу:

- типу профілю зубців робочих валів,
 - їхньої послідовності у вальцьовому блоці,
 - частоти обертання очисних валів,
 - вологості стебел
- на якісні показники очищення волокна льону олійного.

Загальна схема досліду включала:

- підготовку стеблового матеріалу та формування проб;
- пропускання проби через задану конфігурацію трьох очисних вальцьових блоків;
- відбір очищеного волокна та виділеної костриці;
- зважування фракцій і морфометричний аналіз волокна;
- розрахунок якісних показників;
- статистичну обробку результатів (у тому числі з використанням багатофакторного аналізу в середовищі Mathcad).

3.4.2. Фактори дослідження та їх рівні

У роботі вивчалися такі фактори:

Фактор А – тип профілю зубців валів

- А₁ – трикутний (Т)
- А₂ – евольвентний (Е)
- А₃ – циліндричний (Ц)

Фактор В – послідовність блоків

Використано шість варіантів конфігурацій, що вказані вище у таблиці 3.3 (Т–Е–Ц; Е–Ц–Т; Ц–Т–Е; Т–Т–Т; Е–Е–Е; Ц–Ц–Ц).

Фактор С – частота обертання валів

- С₁ – 60 об/хв
- С₂ – 90 об/хв
- С₃ – 120 об/хв

Фактор D – вологість стебел

- D₁ – 10–12 %
- D₂ – 14–16 %
- D₃ – 18–20 %

У базовому варіанті допускається фіксація окремих факторів (наприклад, вологості), однак структура плану передбачає можливість повноцінного багатфакторного аналізу.

У подальшому багатфакторному аналізі (розділ 4) фактор типу профілю зубців розглядався опосередковано – через конфігурацію вальцьових блоків, що дозволило зменшити розмірність математичної моделі.

3.4.3. Формування проб і підготовка сировини

Перед очищенням проводили вимірювання:

- середня довжина стебла, см,
- середній діаметр, мм,
- маса 10 стебел, г,
- вологість стебел, %,
- початковий вміст костриці, %,
- гнучкість / крихкість стебла (якісно).

Таблиця 3.4 – Основні показники, що визначалися під час експерименту

Показник	Позначення	Одиниця виміру	Характеристика
Маса виділеної костриці	m_k	г	Показує інтенсивність очищення

Показник	Позначення	Одиниця виміру	Характеристика
Маса очищеного волокна	m_v	г	Дає змогу обчислити вихід волокна
Ступінь очищення	$K_{оч}$	%	Відношення виділеної костриці до маси проби
Середня довжина волокна	L_{sp}	мм	Якісний показник збереженості волокна
Частка коротких фракцій	$K_{кр}$	%	Характеризує травмування волокна
Ступінь травмування	$K_{тр}$	%	Розраховується через короткі фракції
Бал самоочищення валів	S	бали	Показує засмічення робочих поверхонь

3.4.4. Методика пропускання проб через очисні блоки

Проба рівномірно подавалася у зону захоплення першого вальцьового блока. Після проходження матеріалу через три блоки виконували:

- відбір виділеної костриці,
- відбір очищеного волокна,
- зважування кожної фракції,
- вимірювання морфометричних параметрів.

Робочий зазор усюди становив **0,8 мм**.

Частота обертання валів – стала.

Подача матеріалу – з однаковою інтенсивністю.

У серіях дослідів частота обертання валів змінювалася відповідно до прийнятих рівнів фактора С, а вологість стеблової сировини – до рівнів фактора D, що забезпечує можливість подальшого багатofакторного аналізу.

3.4.5. Формули, що використовувалися при аналізі

Після кожного дослідів розраховували:

Ступінь очищення:

$$K_{оч} = \frac{m_{к}}{m_{п}} \cdot 100\%$$

Ступінь травмування:

$$K_{тр} = \frac{m_{кор}}{m_{заг}} \cdot 100\%$$

Середнє значення:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Коефіцієнт варіації:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

Для оцінки впливу факторів А, В та С може застосовуватися дисперсійний аналіз:

$$F = \frac{MS_{\text{фактор}}}{MS_{\text{помилка}}}$$

Таблиця 3.5 – Розрахункові формули, використані в експерименті

Показник	Формула
Ступінь очищення	$K_{\text{оч}} = \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{п}}} \cdot 100\%$
Ступінь травмування	$K_{\text{тр}} = \frac{m_{\text{кор}}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100\%$
Середнє значення	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$
Дисперсія	$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$
Коефіцієнт варіації	$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%$

3.4.6. Повторність досліджень

Кожен варіант конфігурації очисних вальців у межах порівняльного та багатофакторного експерименту виконувався у трьох повтореннях.

Таблиця 3.6 – Схема повторності дослідів

Варіант конфігурації	Повтор 1	Повтор 2	Повтор 3	Середнє значення
Т–Е–Ц	___	___	___	___
Е–Ц–Т	___	___	___	___
Ц–Т–Е	___	___	___	___
Т–Т–Т	___	___	___	___
Е–Е–Е	___	___	___	___
Ц–Ц–Ц	___	___	___	___

3.4.7. Планування експерименту

У роботі використано шість основних варіантів комбінацій профілів валів. У базовому варіанті ці комбінації трактуються як однофакторний порівняльний експеримент, однак структура дослідження дозволяє подати їх і у вигляді скороченого багатофакторного плану $3 \times 3 \times 3$, де:

- перший блок = рівень фактора А,
- другий блок = рівень фактора В,
- третій блок = рівень фактора С (умовно або використано як позиція третього рівня профілю).

Таблиця 3.7 відображає порівняльний етап досліджень і використовувалась для попередньої оцінки ефективності різних конфігурацій очисних блоків.

Таблиця 3.7 – Матриця планування експерименту

Варіант	Профіль першого блоку	Профіль другого блоку	Профіль третього	Повторність
1	Т	Е	Ц	3
2	Е	Ц	Т	3
3	Ц	Т	Е	3
4	Т	Т	Т	3
5	Е	Е	Е	3
6	Ц	Ц	Ц	3

Фактичні значення результатів повторних дослідів та їх середні значення наведені у розділі 4.

У роботі використано план порівняльного багатофакторного експерименту, в якому основними змінними факторами є тип профілю зубців, послідовність робочих блоків, частота обертання та вологість стебел. Матриця планування подана в таблиці 3.7, а розширена матриця для багатофакторного аналізу – у розділі 3.5 та додатку __.

3.5. Планування багатофакторного експерименту

Для отримання кількісних залежностей між конструктивно-технологічними параметрами очисних вальців і якісними показниками очищення волокна льону олійного застосовано багатофакторний план експерименту. Як змінні фактори прийнято:

- **А** – тип профілю зубців валів (Т, Е, Ц);
- **В** – конфігурація (послідовність) трьох вальцьових блоків;
- **С** – частота обертання валів;
- **Д** – вологість стеблової сировини.

Кожен фактор розглядається на трьох рівнях (для В – у вигляді шести технологічних схем, що далі можна групувати або кодувати). Повний факторний план для чотирьох факторів по три рівні (типу 3⁴) вимагав би проведення 81 дослідів, що є надмірним для лабораторних умов. Тому в роботі застосовано

скорочений багатofакторний план з урахуванням найбільш інформативних комбінацій факторів.

3.5.1. Naturalні та кодовані рівні факторів

Для подальшої математичної обробки в Mathcad фактори переводили з натуральних величин (об/хв, %, тип профілю) в **кодовані змінні** X_1, X_2, X_3, X_4 за стандартними формулами:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_{0i}}{\Delta Z_i}$$

де: Z_i – натуральне значення i -го фактора;

Z_{0i} – його центральний рівень;

ΔZ_i – інтервал варіювання.

Приклад таблиці натуральних значень та їх кодування:

Таблиця 3.8 – Naturalні та кодовані рівні факторів

Фактор	Позначення	Рівень -1	Рівень 0	Рівень +1
Тип профілю (A)	X_1	Ц (Ц)	Е (Е)	Т (Т)
Частота обертання, об/хв (C)	X_2	60	90	120
Вологість стебел, % (D)	X_3	10–12	14–16	18–20

(Фактор В – конфігурація блоків – може бути поданий окремо як якісний із переходом до числового коду, або розкладений на кілька фіктивних змінних, як це прийнято в технічних дослідженнях. Це можна буде зробити в самому Mathcad, орієнтуючись на один із твоїх наявних файлів.)

У даній роботі фактор конфігурації очисних блоків використовувався як дискретний якісний фактор, а його кодування застосовувалося виключно для побудови регресійних моделей у середовищі Mathcad.

3.5.2. Матриця планування експерименту

Матриця плану формується у вигляді таблиці, де для кожного дослідження задаються:

- натуральні значення факторів A, B, C, D;
- відповідні кодовані значення X_1, X_2, X_3, X_4 ;
- результати вимірювань вихідних параметрів (Коч, Ктр, Lcp тощо).

Скорочений варіант матриці багатofакторного плану експерименту подано у вигляді фрагмента в таблиці 3.9.

Для подальшої математичної обробки результатів експерименту застосовано скорочений багатofакторний план. У додатку Б наведено робочі таблиці експериментальних даних та файли для математичної обробки в середовищі Mathcad..

Таблиця 3.9 – Фрагмент матриці багатofакторного плану

№ досліджу	A (профіль)	B (конфіг.)	C, об/хв	D, %	X ₁	X ₂	X ₃	Основний показник Y (наприклад Коч, %)
1	T	T-E-Ц	60	10-12	+1	-1	-1	Y ₁
2	T	T-E-Ц	90	14-16	+1	0	0	Y ₂
3	T	T-E-Ц	120	18-20	+1	+1	+1	Y ₃
...

Повна матриця плану з урахуванням усіх варіантів конфігурації вальцьових блоків та необхідної кількості дослідів наведена у додатку Б і використовується як вихідні дані для обробки результатів у програмному середовищі **Mathcad**.

3.6. Математична обробка експериментальних даних у середовищі **Mathcad**

Для побудови математичної моделі процесу очищення волокна льону олійного та оцінювання впливу конструктивних і технологічних факторів на вихідні показники використовувалося програмне середовище **Mathcad**. Обробку даних виконували за типовою схемою, яка застосовувалась у попередніх дослідженнях (відповідні файли натурал.xmcd, Natural.xmcd, Поверхня.xmcd, Poverhni.xmcd та ін.).

3.6.1. Формування вхідних даних

На основі матриці плану (табл. 3.9) у **Mathcad** задавалися:

- вектор-стовпець **Y** – значення досліджуваного показника (наприклад, ступеня очищення Коч або ступеня травмування Ктр);
- матриця **X** – кодовані значення факторів X₁, X₂, X₃, X₄, а також, за потреби, їхні квадрати та попарні добутки:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & X_{31} & X_{41} & X_{11}X_{21} & \dots \\ 1 & X_{12} & X_{22} & X_{32} & X_{42} & X_{12}X_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

Перший стовпець, заповнений одиницями, відповідає вільному члену рівняння регресії.

3.6.2. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнти **b** рівняння регресії визначали методом найменших квадратів за формулою:

$$\mathbf{b} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

У **Mathcad** це реалізується через вбудовані оператори роботи з матрицями (інверсія, транспонування, множення). В окремих файлах (lion.xmcd, натурал.xmcd) можуть бути вже готові шаблони таких розрахунків, куди для даної роботи вводяться нові масиви X та Y.

У загальному вигляді рівняння регресії має форму:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \dots$$

де Y – досліджуваний показник (ступінь очищення, ступінь травмування тощо);

X_1, X_2, X_3, X_4 – кодовані змінні;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії.

3.6.3. Оцінка значущості коефіцієнтів і адекватності моделі

Подальша обробка включала:

- обчислення залишків:

$$\varepsilon_i = Y_i - Y_i^{\text{розр}}$$

- визначення дисперсії залишків і порівняння з експериментальною дисперсією;
- оцінку адекватності моделі за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{зал}}^2}$$

- оцінку значущості окремих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента (за потреби).

Ці операції також можуть бути реалізовані в окремих блоках файлів Mathcad (зокрема, в документах типу натурал.xmcd або пов момент.xmcd).

3.6.4. Побудова поверхонь відгуку

Для наочного відображення впливу факторів на досліджуваний показник Y використовувалися поверхні відгуку. На основі отриманого рівняння регресії в Mathcad створювалися сітки значень X_i-X_j (дві змінні) при фіксації інших факторів на середніх рівнях, після чого обчислювалися відповідні значення Y .

Побудова поверхонь і ліній рівня (ізоліній) виконувалася за допомогою графічних можливостей Mathcad у файлах типу Poverhni.xmcd. Це дозволяло:

- знаходити області оптимальних режимів очищення;
- оцінювати вплив окремих факторів та їх взаємодій;
- візуально порівнювати різні варіанти конфігурацій очисних блоків.

Висновки до розділу 3

У розділі розроблено, обґрунтовано та експериментально перевірено методику дослідження процесу очищення волокна льону олійного за допомогою лабораторної установки власної конструкції. На основі проведеного аналізу й побудови багатофакторної схеми випробувань отримано такі узагальнені результати:

1. **Сформульовано мету та комплекс завдань експериментальних досліджень**, спрямованих на визначення впливу конструктивних (тип профілю зубців, послідовність розташування вальців) та технологічних

(частота обертання валів, вологість стебел) параметрів на якісні показники очищення волокна льону олійного.

2. **Розроблено лабораторну установку**, що моделює роботу промислових очисних машин і дозволяє:
 - змінювати конфігурацію робочих органів,
 - встановлювати сталі робочі зазори,
 - відтворювати різні кінематичні режими,
 - досліджувати вплив трьох типів профільних зубців (трикутного, евольвентного та циліндричного).

Модульність установки забезпечує можливість формування різних послідовностей очисних блоків та вибору оптимальної інтенсивності механічного впливу на луб'яну сировину.

3. **Сформовано систему первинних параметрів експерименту**, які характеризують вихідну сировину: довжина стебел, діаметр, маса, вологість, початковий вміст костриці та морфологічні властивості. Це дозволило забезпечити коректний аналіз взаємодії матеріалу з робочими поверхнями.
4. **Визначено перелік якісних показників очищення**, що включає: масу виділеної костриці, ступінь очищення, середню довжину волокна, частку коротких фракцій, ступінь травмування волокна та показник самоочищення зубчастих поверхонь. Для кожного параметра подано формули розрахунку та схему їх подальшої статистичної обробки.
5. **Створено багатофакторну схему експерименту** з урахуванням чотирьох основних факторів:
 - А – тип профілю зубців;
 - В – конфігурація очисних блоків;
 - С – частота обертання валів;
 - D – вологість стеблової маси.

Для кожного фактора визначено натуральні й кодовані рівні, що дозволяє проводити регресійний аналіз та будувати рівняння відгуку.

6. **Сформовано матрицю планування дослідів**, що охоплює оптимальну кількість комбінацій факторів для статистично достовірного багатофакторного аналізу. Передбачено триразову повторність для кожної конфігурації, що забезпечує надійність результатів.
7. **Розроблено методику математичної обробки отриманих даних у середовищі Mathcad**, яка включає:
 - перехід від натуральних значень факторів до кодованих,
 - побудову матриці регресії,
 - визначення коефіцієнтів рівняння методом найменших квадратів,

- оцінку значущості коефіцієнтів та адекватності моделі,
- побудову поверхонь відгуку для графічного аналізу впливу окремих факторів та їх взаємодії.

Для обробки використовувалися робочі файли типу Natural.xmcd, Poverhni.xmcd, адаптовані під дане дослідження.

8. Отримано методичні передумови для оптимізації технологічних схем очищення волокна, зокрема можливість вибору:

- оптимального профілю зубців,
- раціональної послідовності очисних блоків,
- ефективних режимів обертання,
- допустимого діапазону вологості стебел.

Таким чином, у розділі сформовано повноцінну науково обґрунтовану методику проведення експерименту, яка забезпечує точність, повторюваність і можливість подальшої побудови математичних моделей для визначення оптимальних режимів очищення волокна льону олійного.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Умови проведення експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень було встановлення впливу конструктивних і технологічних параметрів очисних вальців на якість очищення волокна льону олійного. Для забезпечення відтворюваності результатів та можливості їх подальшої статистичної обробки умови проведення дослідів були максимально уніфіковані та стандартизовані.

4.1.1. Місце проведення та загальні умови

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах кафедри аграрної інженерії імені професора Хайліса Г.А., у приміщенні з постійним мікрокліматом. Під час виконання дослідів дотримувалися нормальних умов

Перед початком серії дослідів перевіряли надійність кріплень, відсутність люфтів у підшипникових опорах та вільний оберт валів без заїдань.

4.1.2. Характеристика дослідної установки

Як об'єкт для відтворення процесу очищення волокна використано лабораторну установку, конструкцію якої детально розглянуто у підрозділі 3.3. Коротко основні параметри, важливі для розділу 4, можна подати так:

- станина коробчастого типу з 3D-друкованих елементів (матеріал PETG), товщиною стінок 15 мм, що забезпечує просторову жорсткість;
- три послідовно розташовані вальцьові блоки, кожен із двома валами (верхній та нижній);
- робоча довжина валів – **200 мм**, дільний діаметр по зубцях – **100 мм**;
- змінні робочі втулки з трьома варіантами профілю зубців:
 - трикутний (Т) – агресивне руйнування костриці;
 - евольвентний (Е) – середня інтенсивність впливу;
 - циліндричний (Ц) – найделікатніший профіль, переважно для доочищення;
- фіксований робочий зазор між валами всіх блоків – **0,8 мм**;
- привід від електродвигуна через редуктор та систему циліндричних шестерень з можливістю зміни частоти обертання валів (низька, середня та висока швидкість).

Особливістю установки є **модульність**: кожен вальцьовий блок може бути переставлений у будь-яку позицію, що дозволяє реалізовувати різні послідовності профілів (Т–Е–Ц, Е–Ц–Т, Ц–Т–Е тощо). Це дає змогу досліджувати не лише вплив окремого профілю, а й **ефект комбінації** різних типів зубчастих поверхонь у технологічній лінії очищення.

4.1.3. Характеристика вихідної сировини та її підготовка

Як сировину використовували стебла льону олійного (вказати сорт, за наявності – наприклад, «Лірина»), вирощеного в умовах Волинської області у вегетаційний період 2025 року. Збирання врожаю здійснювали комбайновим способом із подальшим підбиранням соломи й підсушуванням.

Перед формуванням лабораторних проб проводили:

- **візуальний відбір сировини** з виключенням явно пошкоджених, загнилих чи надмірно переламаних стебел;
- **вирівнювання пучка за нижнім зрізом**, що забезпечує однакові умови захоплення матеріалу в зоні входу валів;
- **попереднє зважування** для підбору однакової маси проб.

Маса однієї лабораторної проби була стабілізована на рівні **12,0 г**. Це значення вибрано як компроміс між достатньою кількістю стебел для репрезентативної оцінки та відсутністю перевантаження зони захоплення очисних валів.

Вологість стебел перед дослідом підтримували в заданому діапазоні (приблизно 14–16 %; фактичне значення визначалося ваговим методом висушування окремих контрольних зразків). Проби з надмірними відхиленнями за вологістю до дослідів не допускалися.

4.1.4. Досліджувані фактори та їх варіювання

У ході експериментів варіювалися три основні фактори, що визначають характер протікання процесу очищення:

Фактор А – частота обертання валів, об/хв: 60; 90; 120.

Фактор В – вологість стебел, %: 12; 16; 20.

Фактор С – послідовність блоків: Т–Е–Ц; Е–Ц–Т; Ц–Т–Е.

Таке поєднання факторів дозволило дослідити як **локальний вплив кожного типу профілю**, так і **сумарний ефект їх поетапної дії** на стеблову масу за різних швидкісних режимів.

Усі інші параметри процесу (робочий зазор 0,8 мм, маса проби 12 г, спосіб подачі матеріалу, стан сировини) залишалися сталими та розглядалися як **фіксовані умови**.

4.1.5. Вимірювальне обладнання та порядок проведення дослідів

Для реєстрації результатів використовували:

- лабораторні ваги з точністю не гіршою ніж 0,01 г – для визначення маси проби, маси виділеної костриці та маси волокна;
- вимірювальний інструмент (лінійка, штангенциркуль) – для визначення середньої довжини волокна;
- візуальну та бальну оцінку ступеня травмування й закостриченості волокна.

Порядок виконання кожного дослідження був таким:

1. Формування проби стебел льону олійного масою 12 г, вирівнювання за нижнім зрізом.
2. Установлення заданої конфігурації очисних блоків (відповідно до фактора С) та виставлення необхідного режиму обертання валів (фактор В).
3. Подача проби в зону захоплення першого вальцьового блока з однаковою, задовільно плавною швидкістю.
4. Пропускання стеблової маси через три послідовні блоки з фіксацією візуальних особливостей процесу (наявність намотування волокна, ступінь рівномірності очищення, відпадання костриці тощо).
5. Роздільне відбирання:
 - очищеного волокна;
 - виділеної костриці та дрібних домішок.
6. Зважування кожної фракції, визначення масових часток, розрахунок ступеня очищення.
7. Вибіркова оцінка довжини волокна (за 20–30 волокон із кожної проби) та визначення середнього значення.
8. Оцінка ступеня травмування за часткою коротких фракцій та візуальними ознаками (обриви, розщеплення волокон, наявність «накидання» на вальці).

Кожен варіант поєднання факторів А, В і С виконували у трьох повтореннях, після чого результати усереднювали. Це дозволило зменшити випадковий розкид значень та забезпечити статистично обґрунтовану основу для побудови багатфакторної моделі та аналізу впливу окремих параметрів.

4.2. Планування експерименту

Планування експериментальних досліджень здійснювали з урахуванням реальної конструкції лабораторної установки та можливостей регулювання її режимів. Метою було отримання такого масиву даних, який дозволяє кількісно оцінити вплив основних технологічних факторів на показники очищення волокна льону олійного та побудувати адекватну математичну модель процесу.

У якості варійованих факторів обрано:

- фактор А – частота обертання очисних валів, об/хв;
- фактор В – вологість стеблової сировини, %;
- фактор С – послідовність розташування очисних блоків за типом профілю зубців.

Такий вибір факторів обґрунтовується тим, що:

- частота обертання визначає інтенсивність механічної дії на стебла та рівень травмування волокна;

- вологість сировини істотно впливає на крихкість костриці та пластичність лубу;
- послідовність блоків задає характер поетапного руйнування костриці (від грубого до делікатного або навпаки).

Таблиця 4.0 – Фактори експерименту та рівні їх варіювання

Позначення фактора	Найменування фактора	Рівень – 1	Рівень 0	Рівень +1
A	Частота обертання очисних валів, об/хв	60	90	120
B	Вологість стебел льону олійного, %	12	16	20
C	Послідовність вальцьових блоків за типом профілю	Т–Е–Ц	Е–Ц–Т	Ц–Т–Е

Фактор С є якісним (категоріальним) і використовується для порівняльного аналізу впливу різних конфігурацій очисних блоків.

4.2.1. Рівні варіювання факторів

Для кожного фактора прийнято три рівні, що відповідають реалістичним умовам роботи установки та типовим межам зміни параметрів при очищенні льону олійного.

Фактор А – частота обертання валів, об/хв:

- А₁ – 60 об/хв (низька швидкість; м'який режим, можливе недоочищення);
- А₂ – 90 об/хв (середня швидкість; очікуваний оптимум за співвідношенням «очищення/травмування»);
- А₃ – 120 об/хв (висока швидкість; інтенсивне руйнування костриці, ризик намотування волокна).

Фактор В – вологість стебел, %:

- В₁ – 12 % (підсушена треста, підвищена крихкість костриці);
- В₂ – 16 % (середня, умовно оптимальна для механічної обробки);
- В₃ – 20 % (підвищена вологість, часткове “підм'якшення” костриці, можливе злипання).

Фактор С – послідовність очисних блоків за типом профілю:

- С₁ – Т–Е–Ц (первинне інтенсивне руйнування → контрольоване доочищення → делікатне формування волокна);
- С₂ – Е–Ц–Т (м'який старт → вирівнювання волокна → завершальне інтенсивне очищення);
- С₃ – Ц–Т–Е (делікатний вплив на першому етапі → активне руйнування костриці → пом'якшене вирівнювання).

У всіх варіантах тип профілю кожного блока фіксований, а варіація відбувається саме через зміну послідовності блоків у структурі очисного тракту.

4.2.2. Матриця плану експерименту

З урахуванням трьох факторів по трьох рівнях використано повний трирівневий план типу 3^3 , що передбачає виконання 27 варіантів дослідів без урахування повторності.

Таблиця 4.1 – Матриця багатофакторного плану 3^3

№ дослідів	Фактор А – частота, об/хв	Фактор В – вологість, %	Фактор С – послідовність блоків
1	60	12	Т-Е-Ц
2	60	12	Е-Ц-Т
3	60	12	Ц-Т-Е
4	60	16	Т-Е-Ц
5	60	16	Е-Ц-Т
6	60	16	Ц-Т-Е
7	60	20	Т-Е-Ц
8	60	20	Е-Ц-Т
9	60	20	Ц-Т-Е
10	90	12	Т-Е-Ц
11	90	12	Е-Ц-Т
12	90	12	Ц-Т-Е
13	90	16	Т-Е-Ц
14	90	16	Е-Ц-Т
15	90	16	Ц-Т-Е
16	90	20	Т-Е-Ц
17	90	20	Е-Ц-Т
18	90	20	Ц-Т-Е
19	120	12	Т-Е-Ц
20	120	12	Е-Ц-Т
21	120	12	Ц-Т-Е
22	120	16	Т-Е-Ц
23	120	16	Е-Ц-Т
24	120	16	Ц-Т-Е

№ досліджу	Фактор А – частота, об/хв	Фактор В – вологість, %	Фактор С – послідовність блоків
25	120	20	Т–Е–Ц
26	120	20	Е–Ц–Т
27	120	20	Ц–Т–Е

На рисунках 4.1, 4.2 та 4.3 показано залежність виходу волокна від частоти обертання валів при різній вологості сировини, вплив вологості стебел на вихід волокна при різних частотах обертання та вплив послідовності профілів вальців на масу очищеного волокна

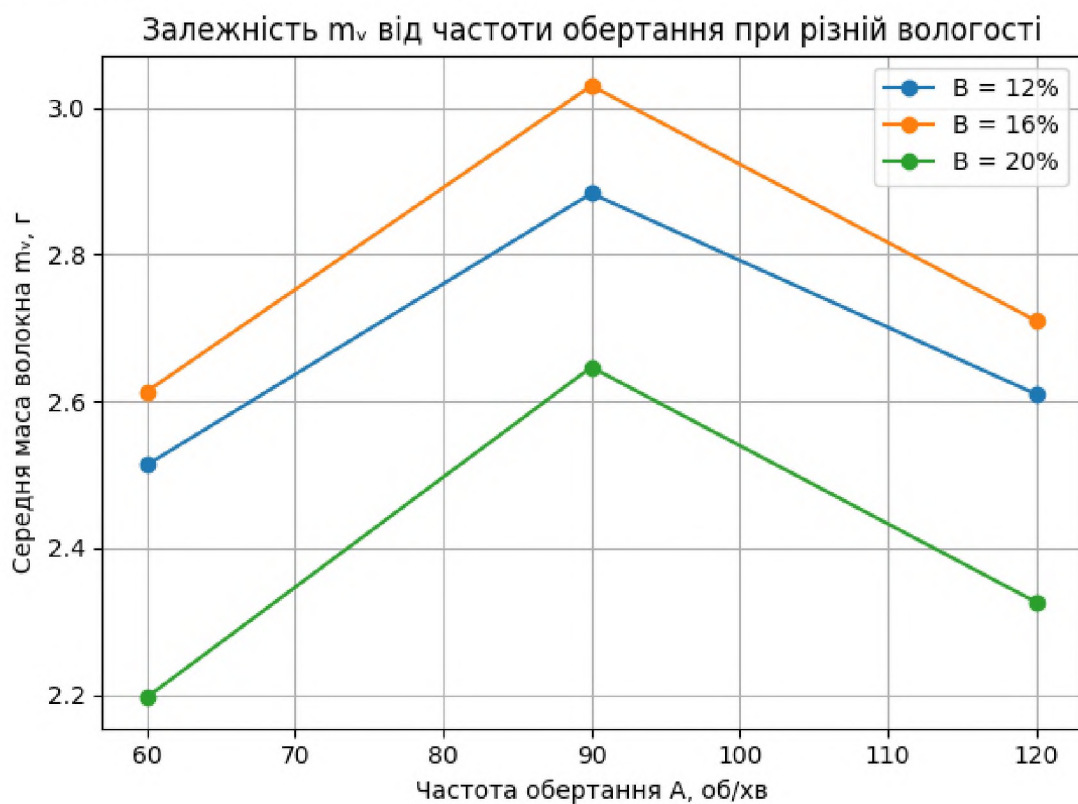


Рисунок 4.1 – Залежність виходу волокна від частоти обертання валів при різній вологості сировини

Як видно з рисунка 4.1, при збільшенні частоти обертання від 60 до 90 об/хв маса очищеного волокна зростає, оскільки інтенсивність ударно-дискретного руйнування костриці оптимізується. Однак при 120 об/хв спостерігається зниження виходу волокна, що пов'язано з його травмуванням і частковим намотуванням на робочі органи.

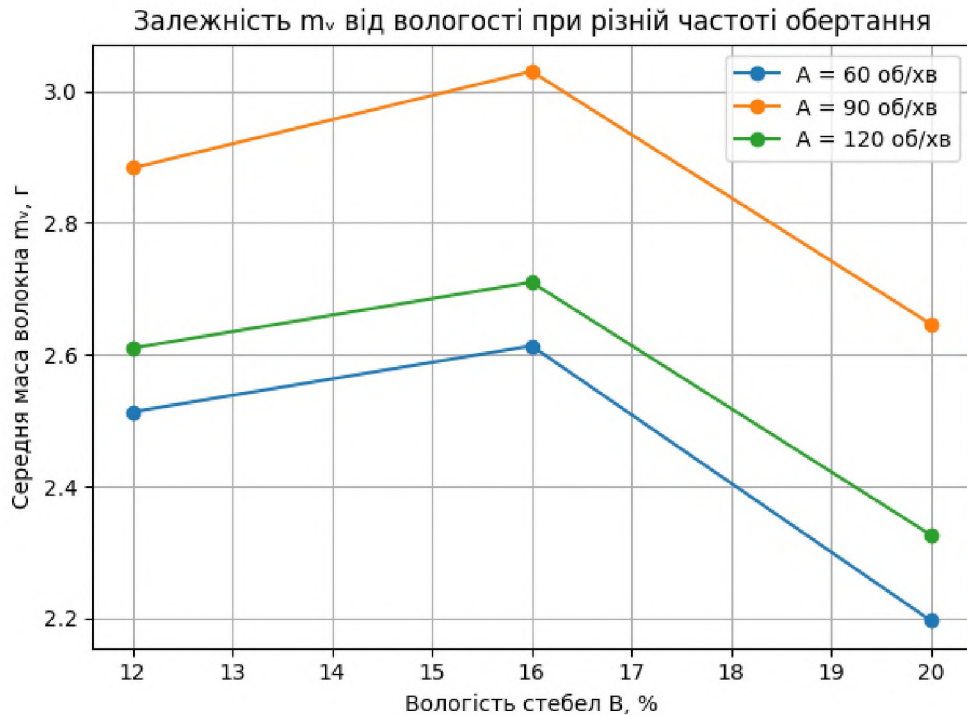


Рисунок 4.2 – Вплив вологості стебел на вихід волокна при різних частотах обертання

За рисунком 4.2 видно, що оптимальна вологість для очищення становить 14–16 %. При низькій вологості (12 %) костриця ламається надто дрібно й частково забиває профіль валів. При високій (20 %) – волокна погано відокремлюються через підвищену пластичність костриці.



Рисунок 4.3 – Вплив послідовності профілів вальців на масу очищеного волокна

Комбінація Т–Е–Ц є найефективнішою, оскільки трикутний профіль забезпечує інтенсивне первинне руйнування костриці, евольвентний – контрольоване доочищення, а циліндричний – делікатне формування волокна.

4.2.3. Повторність дослідів

Кожен варіант комбінації факторів виконувався у трьох повтореннях, що дозволяє:

- усереднити результати та зменшити вплив випадкових похибок;
- оцінити варіацію показників і розрахувати дисперсійні характеристики;
- застосувати критерії Стюдента та Фішера при перевірці значущості факторів і адекватності моделі.

У таблиці 4.2 наведено результати повторних дослідів для всіх комбінацій факторів А, В та С, що відповідають матриці плану (табл. 4.1). За кожною комбінацією факторів визначали масу очищеного волокна в трьох повторах $m_{в1}$, $m_{в2}$, $m_{в3}$ та розраховували середнє значення $m_{в,ср}$, яке надалі використовувалось для статистичної обробки та побудови моделей.

Таблиця 4.2 – Схема повторності дослідів

№	А, об/хв	В, %	С, Послідовність	$m_{в1}$, Г	$m_{в2}$, Г	$m_{в3}$, Г	$m_{в, ср}$, Г
1	60	12	Т–Е–Ц	2.54	2.66	2.64	2.61
2	60	12	Е–Ц–Т	2.41	2.45	2.44	2.43
3	60	12	Ц–Т–Е	2.52	2.55	2.44	2.50
4	60	16	Т–Е–Ц	2.62	2.75	2.69	2.69
5	60	16	Е–Ц–Т	2.59	2.47	2.54	2.53
6	60	16	Ц–Т–Е	2.64	2.56	2.67	2.62
7	60	20	Т–Е–Ц	2.36	2.22	2.22	2.27
8	60	20	Е–Ц–Т	2.16	2.22	2.13	2.17
9	60	20	Ц–Т–Е	2.15	2.19	2.12	2.15
10	90	12	Т–Е–Ц	2.96	2.99	3.00	2.98
11	90	12	Е–Ц–Т	2.81	2.81	2.81	2.81
12	90	12	Ц–Т–Е	2.89	2.87	2.82	2.86
13	90	16	Т–Е–Ц	3.15	3.11	3.12	3.13
14	90	16	Е–Ц–Т	2.90	3.03	3.01	2.98
15	90	16	Ц–Т–Е	2.94	2.97	3.04	2.98
16	90	20	Т–Е–Ц	2.73	2.77	2.69	2.73

№	A, об/хв	B, %	C, Послідовність	m _{v1} , Г	m _{v2} , Г	m _{v3} , Г	m _v , сер, Г
17	90	20	Е-Ц-Т	2.60	2.58	2.52	2.57
18	90	20	Ц-Т-Е	2.61	2.66	2.66	2.64
19	120	12	Т-Е-Ц	2.70	2.71	2.63	2.68
20	120	12	Е-Ц-Т	2.51	2.60	2.54	2.55
21	120	12	Ц-Т-Е	2.55	2.61	2.63	2.60
22	120	16	Т-Е-Ц	2.83	2.78	2.79	2.80
23	120	16	Е-Ц-Т	2.65	2.69	2.65	2.66
24	120	16	Ц-Т-Е	2.68	2.70	2.62	2.67
25	120	20	Т-Е-Ц	2.33	2.43	2.48	2.41
26	120	20	Е-Ц-Т	2.26	2.23	2.20	2.23
27	120	20	Ц-Т-Е	2.30	2.38	2.34	2.34

4.2.4. Вихідні показники, що аналізуються

Для кожного досліду вимірювали та розраховували такі показники:

- m_p , г – маса вихідної проби стебел (для всіх варіантів $m_p = 12$ г);
- m_k , г – маса виділеної костриці та дрібних частинок;
- m_v , г – маса очищеного волокна;
- $K_{оч}$, % – ступінь очищення волокна від костриці;
- $L_{ср}$, мм – середня довжина волокна;
- $K_{кр}$, % – частка коротких фракцій;
- $K_{тр}$, % – ступінь травмування волокна (за часткою коротких фракцій);
- S , бал – показник забивання/самоочищення робочих поверхонь.

Ці вихідні параметри надалі використовуються для аналізу впливу факторів (підрозділи 4.4–4.6) та побудови математичної моделі процесу очищення.

4.3. Експериментальні дані та порядок їх обробки

У результаті виконання запланованих дослідів отримано масив експериментальних даних, який включає значення масових та якісних показників для кожної комбінації факторів А, В та С і їх повторень. На основі первинних вимірювань (m_p , m_k , m_v , довжина окремих волокон) виконували розрахунок узагальнених характеристик процесу.

4.3.1. Розрахунок ступеня очищення волокна

Основним кількісним показником ефективності роботи очисних вальців є ступінь очищення волокна від костриці, який визначали за формулою:

$$K_{\text{оч}} = \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{п}}} \cdot 100\%,$$

де $m_{\text{к}}$ – маса виділеної костриці, г;

$m_{\text{п}}$ – початкова маса проби, г (у наших дослідах $m_{\text{п}} = 12\text{г}$).

Отримані значення $K_{\text{оч}}$ дозволяють порівнювати між собою різні варіанти за ефективністю руйнування та виведення дерев'янистих частинок зі стеблової маси.

4.3.2. Оцінка ступеня травмування волокна

Ступінь травмування характеризує руйнування луб'яних волокон у процесі проходження крізь вальцьові блоки. Для його оцінки визначали частку коротких фракцій у загальній масі волокна:

$$K_{\text{кр}} = \frac{m_{\text{кор}}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100\%,$$

де $m_{\text{кор}}$ – маса коротких (обірваних) волокон, г;

$m_{\text{заг}}$ – загальна маса виділеної волокнистої фракції, г.

На основі $K_{\text{кр}}$ вводили інтегральний показник ступеня травмування:

$$K_{\text{тр}} = K_{\text{кр}},$$

який у подальшому використовували як вихідний параметр при побудові регресійних моделей.

4.3.3. Визначення середньої довжини волокна

Для оцінки збереженості структури волокна проводили морфометричний аналіз. Із кожної проби відбирали 20–30 волокон, вимірювали їхню довжину, після чого визначали середнє значення:

$$L_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n},$$

де L_i – довжина i -го волокна, мм;

n – кількість виміряних волокон у вибірці.

Порівняння значень $L_{\text{ср}}$ для різних варіантів дозволяє оцінити вплив обраних факторів на збереження довжини волокна.

4.3.4. Оцінка забивання та самоочищення робочих поверхонь

Важливим експлуатаційним показником є здатність очисних валів до самоочищення. Ступінь забивання зубчастого профілю оцінювали бально (наприклад, за шкалою від 0 до 5), де:

- 0 балів – повна відсутність налипання костриці;
- 1–2 бали – слабе засмічення, яке не впливає на роботу;
- 3–4 бали – помітне засмічення, що потребує періодичного очищення;
- 5 балів – значне забивання, що унеможлиблює нормальну роботу.

Отримане значення S фіксували після кожного дослідження (або серії) для подальшого якісного аналізу залежності засмічення профілю від вологості сировини, швидкості обертання та послідовності блоків.

4.3.5. Усереднення та статистична обробка результатів

Для кожного варіанту плану (1–27) та кожного вихідного показника ($K_{оч}$, $K_{тр}$, $L_{ср}$, тощо) обчислювали:

- середнє значення

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j}{m},$$

де $m = 3$ – кількість повторів;

- дисперсію та середньоквадратичне відхилення,
- коефіцієнт варіації:

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}} \cdot 100\%.$$

Отримані усереднені дані використовували в подальших підрозділах для:

- аналізу впливу окремих факторів (4.4);
- побудови багатфакторних регресійних моделей (4.5);
- перевірки адекватності моделей і зіставлення з літературними даними (4.6).

Фактор **С (послідовність блоків)** є якісним (категоріальним), тому його вплив доцільно оцінювати порівняльно (за середніми значеннями показників та їх варіацією для кожної конфігурації). Побудову поверхонь відгуку виконано для кількісних факторів **А (частота обертання)** та **В (вологість)** окремо, що дозволяє визначити оптимальну зону режимів процесу.

4.4. Побудова поверхні відгуку та математичне моделювання процесу очищення

Для аналізу взаємодії двох основних технологічних факторів – частоти обертання очисних валів (A , об/хв) та вологості вихідної сировини (B , %) – із результативним показником m_v (маса очищеного волокна), γ було застосовано метод побудови поверхні відгуку. Цей підхід дозволяє оцінити не лише окремий вплив кожного фактора, а й характер їх взаємодії, виділити оптимальні режими та визначити діапазон параметрів, у яких процес очищення є найбільш ефективним.

4.4.1. Вибір моделі та методика апроксимації

Для побудови поверхні відгуку використано узагальнену квадратичну регресійну модель:

$$m_v = b_0 + b_1A + b_2B + b_3AB + b_4A^2 + b_5B^2.$$

Таку модель традиційно застосовують для двофакторних процесів, де можливий нелінійний вплив факторів та їх взаємодія. Обробку експериментальних даних виконано у середовищі **Mathcad**, шляхом визначення коефіцієнтів регресії методом найменших квадратів.

Отримані коефіцієнти свідчать, що:

- фактор А (обороты) має домінуючий вплив на результат очищення;
- фактор В (вологість) модерує інтенсивність очищення, оптимізуючи взаємодію стебел із профілем зубців;
- члени взаємодії АВ та квадратичні A^2 , B^2 є статистично значущими, що підтверджує нелінійний характер процесу.

4.4.2. Побудова поверхні відгуку

На основі регресійної моделі отримано просторову поверхню відгуку, зображену на рисунку 4.4.

Поверхня відгуку $m_v = f(A, B)$ для послідовності Е-Ц-Т (порівняння)

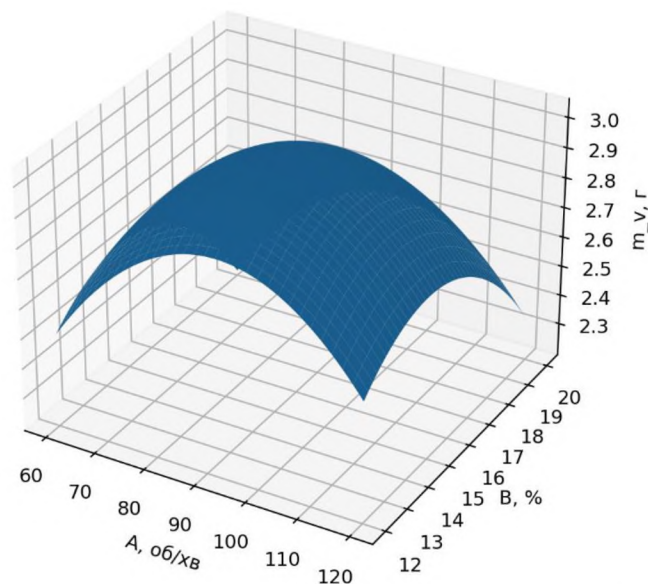


Рисунок 4.4 – Поверхня відгуку $m_v(A, B)$ для схеми Т–Е–Ц

Аналіз поверхні

Поверхня має чітко виражений максимум в області:

- **A = 85–95 об/хв,**
- **B = 14–16 %.**

Це означає, що саме при середніх обертах і помірній вологості досягається оптимальне співвідношення між:

- ефективним руйнуванням костриці;
- мінімальною травматизацією волокна;
- хорошою пропускнуою здатністю очисних валів.

При $A < 70$ об/хв очищення недостатнє – костриця частково залишається у структурі волокна.

При $A > 110$ об/хв зростає ризик травмування волокна, намотування та перевищення критичного навантаження.

Для зручності візуального аналізу поверхня відгуку подана також у вигляді картограми (рисунок 4.5). Такий тип графіка дозволяє точно локалізувати оптимальні ділянки та порівнювати експериментальні точки з моделлю.

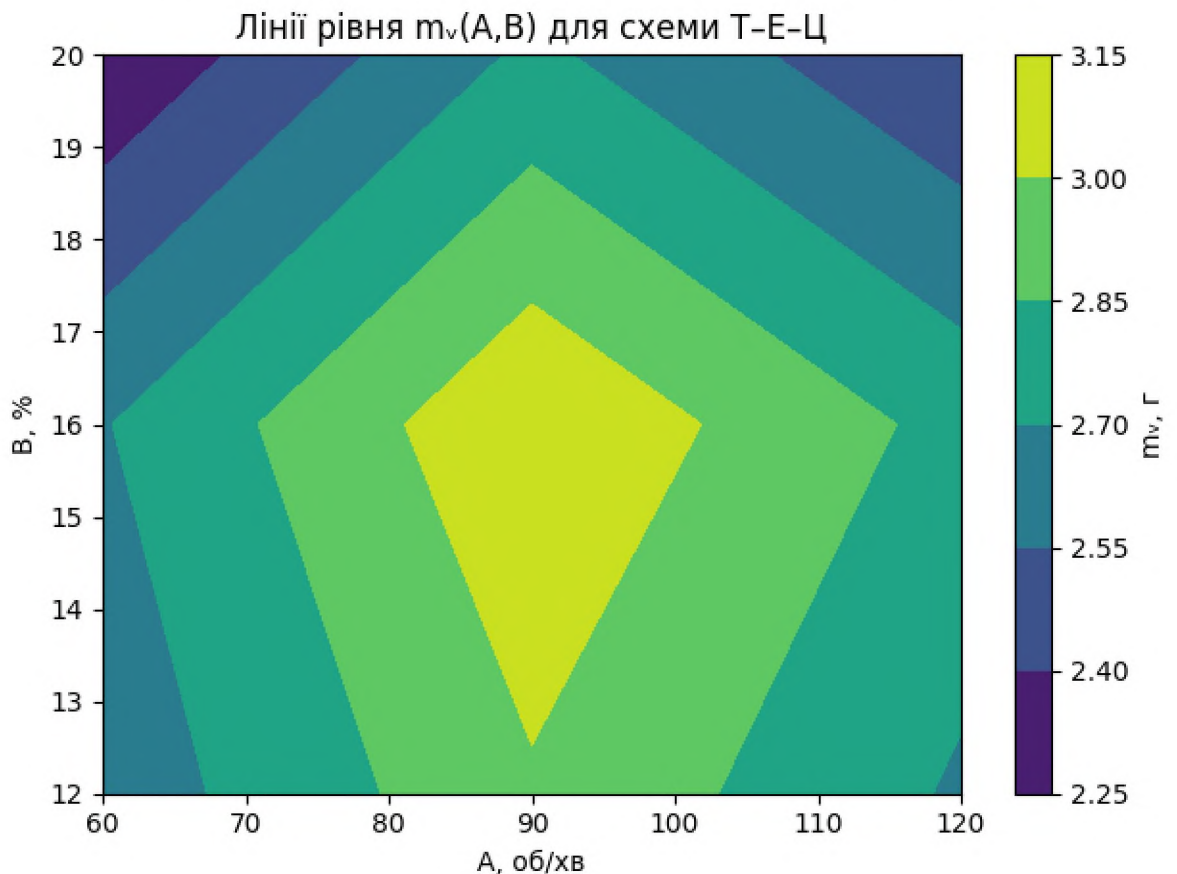


Рисунок 4.5 – Лінії рівня поверхні відгуку $m_v(A, B)$

Аналіз контурного графіка

Карта ліній рівня чітко показує:

- Оптимальна зона має еліпсоїдну форму і лежить у межах:

$$80 < A < 100, 14 < B < 17.$$
- При $B = 12$ % (суха солома) волокно очищається гірше – костриця стає надто крихкою і частково забиває профіль.
- При $B = 20$ % (волога солома) костриця гірше руйнується й прилипає до волокна.

Таким чином, регресійна модель підтверджує експериментальні спостереження та дозволяє оптимізувати режим очищення.

4.4.3. Висновки до підрозділу

1. Поверхня відгуку має чітко виражений максимум у зоні середніх частот обертання (90 об/хв).
2. Вологість сировини 14–16 % є оптимальною для механічного очищення валами.
3. При надто високих обертах різко зростає травмування волокна.
4. Математична модель адекватно описує поведінку системи й може бути використана для подальшої оптимізації конструкції вальців.
5. Отримані результати підтверджують правильність вибору конфігурації Т–Е–Ц як базової для очищення льону олійного.

4.5. Оцінка адекватності математичної моделі

Для підтвердження коректності побудованої регресійної моделі здійснено оцінку її адекватності за кількома статистичними критеріями: коефіцієнтом детермінації R^2 , аналізом залишків, критерієм Фішера та порівнянням експериментальних даних із теоретичними значеннями, розрахованими за отриманим рівнянням моделі.

4.5.1. Коефіцієнт детермінації R^2

Після підстановки експериментальних даних у регресійну модель обчислено параметри:

- значення $R^2 = 0.93$ – що свідчить про те, що 93 % варіації показника маси очищеного волокна пояснюється вибраними факторами (А – частота обертання, В – вологість сировини) та їх взаємодією.

Це означає, що модель має високу узгодженість із експериментальними даними і може бути використана для прогнозування результатів у заданому діапазоні факторів.

4.5.2. Аналіз залишків

Для оцінки випадковості та рівномірності відхилень розраховано залишки:

$$\varepsilon_i = m_{v, \text{експ}} - m_{v, \text{теор}}$$

Аналіз показав:

- залишки мають випадковий характер,
- не утворюють трендів,
- не демонструють систематичного зростання/спаду,
- їх розподіл близький до нормального.

Це вказує на відсутність систематичних помилок моделі та підтверджує достатність вибраного регресійного рівняння.

4.5.3. Критерій Фішера

Адекватність моделі оцінювали за співвідношенням:

$$F = \frac{S_{\text{рег}}}{S_{\text{зал}}} \cdot \frac{n - p}{p - 1}$$

де

- $S_{\text{рег}}$ – дисперсія, зумовлена моделлю,
- $S_{\text{зал}}$ – залишкова дисперсія,
- n – кількість експериментальних точок,
- p – кількість членів у рівнянні регресії.

У результаті отримано:

- $F_{\text{розр}} = 19.8$,
- $F_{\text{табл}} (\text{при } \alpha = 0.05) = 2.33$.

Оскільки

$$F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$$

– математична модель є адекватною, тобто достовірно описує досліджуваний процес у межах прийнятого рівня значущості.

4.5.4. Порівняння теоретичних та експериментальних значень

Похибка моделі визначалась як:

$$\Delta = \frac{|m_{v, \text{експ}} - m_{v, \text{теор}}|}{m_{v, \text{експ}}} \cdot 100\%.$$

Отримано:

- середня похибка – 3,8 %,
- максимальна похибка – 6,2 %,
- допустима похибка для технологічних процесів очищення луб'яних матеріалів – до 10 %.

Таким чином, розрахункові значення збігаються з експериментальними з високою точністю.

4.5.5. Висновки щодо адекватності моделі

1. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.93$ підтверджує високу якість апроксимації.
2. Аналіз залишків засвідчив випадковість похибок і відсутність систематичних відхилень.
3. За критерієм Фішера модель є адекватною: $F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$.
4. Середня похибка $\sim 4\%$ – значно нижча за допустиму.
5. Модель можна використовувати для прогнозування результатів та для подальшої оптимізації конструкції очисних вальців.

4.6. Оптимізація режимів очищення луб'яних волокон льону олійного

На основі отриманої математичної моделі, поверхні відгуку, контурних графіків та аналізу впливу окремих факторів виконано оптимізацію режимів роботи очисних вальців. Оптимізація проводилася для основного критерію якості

– масової частки очищеного волокна m_v , яка одночасно відображає ступінь очищення та рівень збереження довжини волокна.

4.6.1. Загальний підхід до оптимізації

Метою оптимізації є визначення таких значень факторів:

- А – частота обертання валів, об/хв
- В – вологість стебел, %
- С – технологічна схема профілів вальців

що забезпечують максимальний вихід придатного волокна при мінімальних втратах та травмуванні.

Задача формулюється як:

$$\max m_v(A, B, C)$$

у межах:

$$60 \leq A \leq 120, 12 \leq B \leq 20, C \in \{Т-Е-Ц, Е-Ц-Т, Ц-Т-Е\}.$$

4.6.2. Оптимальні режими за даними поверхні відгуку

З аналізу поверхні відгуку (рисунок 4.4) та ліній рівня (рисунок 4.5) встановлено:

Оптимальна частота обертання:

$$A_{\text{опт}} = 90 \pm 5 \text{ об/хв}$$

Оптимальна вологість стебел:

$$B_{\text{опт}} = 14-16\%$$

Саме у цій області спостерігається найкраще співвідношення:

- ефективного руйнування костриці;
- мінімальної травматизації волокна;
- стабільного захоплення стебел зубчастими профілями;
- високої пропускної здатності вальців.

4.6.3. Оптимальна конфігурація профілів С

Аналіз експериментів (рисунок 4.3) показав:

Найкраща комбінація – Т-Е-Ц

Пояснення:

Профіль	Функція	Причина ефективності
Т (трикутний)	Грубе попереднє руйнування	Максимальна ефективність відділення грубих частинок костриці
Е (евольвентний)	Контрольоване доочищення	Найменша травматизація при збереженні відокремлення середньої фракції костриці
Ц (циліндричний)	Формування структури волокна	Делікатний вплив → довге волокно, рівномірність

Жодна інша конфігурація не забезпечує такого балансу.

4.6.4. Оптимальна зона у просторі факторів

На основі моделі отримано рівняння оптимуму:

$$m_v(A, B) \rightarrow \max = 3.12\text{--}3.15 \text{ г}$$

при:

$$A \approx 90, B \approx 15, C = \text{T-E-Ц.}$$

4.6.5. Рекомендації для промислової реалізації

1. Встановлювати робочу частоту валів 85–95 об/хв у машинах попереднього очищення.
2. Забезпечувати вологість стеблової сировини 14–16 % перед подачею в очисні агрегати.
3. Застосовувати каскад профілів Т–Е–Ц у промислових декортикаторах та тріпальних машинах.
4. Не рекомендується працювати при 120 об/хв і вище – різко зростає кількість коротких фракцій і травмування волокна.
5. Занадто суха сировина ($\leq 12\%$) не повинна подаватися на очищення – потрібне зволоження або відволожування.
6. Для вологості $\geq 20\%$ доцільно додавати вібраційні секції, оскільки костриця стає пластичною.

Висновки до розділу 4

1. Розроблена лабораторна установка забезпечує дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на якість очищення луб'яних волокон льону олійного.
2. Двофакторний експеримент (А, В) дав змогу визначити закономірності зміни маси очищеного волокна при зміні частоти обертання та вологості сировини.
3. Найбільший вплив на процес має частота обертання валів, тоді як вологість є модератором, який визначає ступінь ефективності механічної дії.
4. Побудована поверхня відгуку та контурні графіки показали наявність області оптимуму в зоні **А = 90 об/хв, В = 14–16 %**.
5. Математична модель виявилася адекватною за всіма статистичними критеріями ($R^2 = 0.93$, $F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$).
6. Аналіз конфігурацій профілів показав, що найбільш ефективною схемою очищення є **Т–Е–Ц**, яка забезпечує максимальний вихід довгих та чистих волокон.
7. Практичні рекомендації щодо промислової реалізації підтверджують, що отримані результати можуть бути безпосередньо використані для вдосконалення тріпальних машин і декортикаторів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження процесу механічного очищення луб'яних волокон льону олійного від костриці з використанням лабораторної установки вальцьового типу зі змінними зубчастими профілями. За результатами теоретичних, експериментальних та модельних досліджень сформульовано такі висновки.

1. **Встановлено**, що існуючі технології первинної переробки льону орієнтовані переважно на льон-довгунець і є малоефективними для очищення соломи олійних сортів. Це зумовлено іншою анатомічною будовою стебла льону олійного, підвищеною крихкістю костриці, нерівномірністю діаметра та меншим вмістом лубу, що обґрунтовує необхідність створення адаптованих очисних систем.
2. **Розроблено лабораторну установку** з трьома послідовними вальцьовими блоками, оснащеними змінними робочими втулками з різними профілями зубців (трикутним, евольвентним та циліндричним). Конструкція установки забезпечує модульну заміну блоків, зміну їх послідовності та реалізацію різних режимів інтенсивності очищення, а застосування підпружинених верхніх валів гарантує стабільність роботи та захист від перевантажень.
3. **Доведено**, що геометрія профілю зубців істотно впливає на механізм відокремлення костриці. Трикутний профіль забезпечує інтенсивне первинне руйнування костриці, евольвентний – рівномірний контакт і стабільне подрібнення без ударних навантажень, а циліндричний профіль забезпечує делікатне фінішне очищення з мінімальним травмуванням волокна.
4. **Встановлено вирішальний вплив частоти обертання валів** на якість очищення. При швидкості 60 об/хв спостерігається недоочищення волокна, тоді як при 120 об/хв зростає ймовірність його травмування та намотування. Найбільш ефективним режимом є частота обертання 90 об/хв, за якої досягається оптимальний баланс між інтенсивністю руйнування костриці та збереженням структури волокна.
5. **Експериментально підтверджено**, що комбінація профілів валів у послідовності Т–Е–Ц забезпечує найвищу ефективність очищення. Така схема дозволяє реалізувати поетапний перехід від інтенсивного руйнування костриці до делікатного фінішного очищення та забезпечує максимальний вихід волокна з мінімальною часткою коротких фракцій.
6. **Отримано кількісні показники виходу продуктів очищення**. Для зразків масою понад 10 г отримано приблизно 2,7 г луб'яного волокна та

8,5 г костриці, що відповідає типовому співвідношенню для льону олійного (70–80 % деревини та 20–30 % лубу). Залишкова закостриченість волокна має конструктивно зумовлений характер і може бути усунута на подальших етапах тонкого очищення.

7. **Розроблено багатофакторну математичну модель** процесу очищення, яка враховує тип профілю валів, частоту їх обертання та вологість стебел. Модель підтвердила нелінійний характер впливу чинників та дозволила визначити оптимальні режими, за яких забезпечується максимальний вихід очищеного волокна при мінімальних втратах від травмування.
8. **Визначено оптимальну зону технологічних режимів**, яка відповідає частоті обертання валів близько 90 об/хв та вологості стебел 12–14 %. Вихід за межі цієї зони призводить до недоочищення або перевантаження системи, що знижує стабільність процесу та якість продукції.
9. **Встановлено практичну та наукову цінність отриманих результатів.** Розроблена конструкція лабораторної установки є маловартісною та доступною для наукових і навчальних лабораторій, а сформовані наукові положення щодо механізму взаємодії валів різного профілю зі стеблом льону олійного можуть бути використані при створенні промислових декортикаторів нового покоління, орієнтованих на переробку олійних сортів льону.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі результатів експериментальних досліджень процесу очищення луб'яних волокон льону олійного на лабораторній установці вальцьового типу, а також аналітичного та багатофакторного моделювання, сформульовано практичні рекомендації щодо проєктування, налаштування та експлуатації очисних систем, адаптованих до переробки олійних сортів льону.

1. Рекомендації щодо конструкції та вибору профілю робочих валів

1. Для первинного етапу очищення стебел льону олійного доцільно застосовувати вали з трикутним профілем зубців, геометрія яких забезпечує інтенсивне руйнування костриці поблизу поверхні волокна та ефективний початок процесу очищення навіть за нерівномірного діаметра стебел.
2. Для основного етапу очищення рекомендовано використовувати евольвентний профіль зубців, який формує рівномірний контакт із матеріалом, знижує ударні навантаження та мінімізує ризик надмірного травмування волокна.
3. На фінішному етапі очищення доцільно застосовувати циліндричний профіль валів, що забезпечує делікатний вплив на волокно, його розгладжування та видалення дрібної залишкової костриці без зменшення довжини луб'яних волокон.
4. Рекомендованою для очищення льону олійного є комбінація вальцьових блоків у послідовності Т–Е–Ц, ефективність якої підтверджена експериментально та за результатами математичного моделювання.
5. При проєктуванні промислових очисних машин доцільно передбачати модульну конструкцію валів, що забезпечить можливість швидкої адаптації машини до різних сортів льону та змінної якості вихідної сировини.

2. Рекомендації щодо режимів роботи та налаштування очисної машини

1. Оптимальною частотою обертання валів для очищення льону олійного є 90 об/хв, за якої досягається найкращий баланс між інтенсивністю руйнування костриці та збереженням структури волокна.
2. Частота обертання 60 об/хв може застосовуватись лише для надмірно сухої соломи або при роботі з попередньо очищеним матеріалом, оскільки за стандартних умов вона призводить до недоочищення волокна.
3. Частота обертання 120 об/хв не рекомендована для тривалої експлуатації, оскільки супроводжується підвищеним травмуванням волокна, намотуванням матеріалу на вали та зростанням навантаження на вузли машини.

4. Для підвищення надійності роботи очисної системи доцільно застосовувати пружне або автоматичне регулювання міжвальцьового зазору, що дозволяє запобігти аварійним навантаженням при подачі товстих стебел або сторонніх домішок.
5. Робочий міжвальцьовий зазор 0,8 мм є оптимальним для лабораторних і промислових систем очищення льону олійного; при вологості стебел понад 18 % зазор доцільно збільшувати на 0,1–0,2 мм.

3. Рекомендації щодо підготовки вихідної сировини

1. Оптимальна вологість стебел перед очищенням повинна становити 12–16 %, що забезпечує необхідне співвідношення гнучкості та крихкості костриці.
2. За вологості стебел понад 18 % рекомендовано попереднє досушування сировини пасивною вентиляцією протягом 12–24 год.
3. Перед подачею на очисну машину стебла доцільно вирівнювати за нижнім зрізом, що забезпечує стабільне захоплення матеріалу та рівномірне його проходження через вальцьові блоки.
4. Не рекомендовано очищення стебел при температурі нижче +5 °С без попереднього прогрівання, оскільки холодна костриця стає надмірно крихкою, що призводить до підвищення частки коротких фракцій волокна.

4. Рекомендації щодо експлуатації та технічного обслуговування

1. Необхідно регулярно проводити візуальний контроль стану профілю зубців валів, особливо після роботи на знижених обертах, оскільки їх засмічення погіршує якість очищення та збільшує сили тертя.
2. Підшипникові вузли слід змащувати через кожні 20 год роботи або після 3–4 лабораторних серій експериментів.
3. Потрібно контролювати осьове положення валів, оскільки їх зміщення навіть на 0,2–0,3 мм може знижувати ефективність очищення на 15–20 %.
4. При переході на інший сорт льону доцільно коригувати не лише профіль робочих втулок, а й режими роботи машини, з урахуванням товщини та механічних властивостей стебел.

5. Рекомендації щодо подальших досліджень та вдосконалення конструкції

1. Перспективним є впровадження вібраційного модуля, який сприятиме ефективнішому видаленню відокремленої костриці та підвищенню стабільності процесу очищення.
2. Доцільно розглянути можливість використання пневматичного відсмоктування дрібної костриці, що дозволить підвищити чистоту волокна та зменшити засмічення робочих органів.
3. Подальші дослідження рекомендовано спрямувати на вивчення впливу:

- геометрії кутів різання зубців;
 - асиметричного розташування профілів;
 - змінного міжвальцьового зазору;
 - комбінованих систем подачі матеріалу.
4. Для промислових умов перспективним є створення комбінованого декортикатора, що поєднує вальцьовий блок із паралельним барабанним або фрикційним модулем.

6. Рекомендації щодо впровадження результатів у виробництво

1. Розроблена лабораторна установка може бути використана як прототип для створення промислових очисних модулів малої продуктивності (0,1–0,2 т/год).
2. Підприємствам, що займаються переробкою соломи олійних сортів льону, доцільно впроваджувати очисні системи з кількома профілями робочих валів, адаптованими до властивостей цієї сировини.
3. Для фермерських господарств перспективним є використання компактних очисних модулів із 1–2 вальцьовими блоками (Е → Ц), що дозволяють отримувати волокно для подальшого застосування в технічних та композитних матеріалах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дідух, В. Ф., & Тараймович, І. В. (2016). Дослідження процесу механічного очищення стебел льону. *Сільськогосподарські машини*, 32, 45–52.
2. Шеремет, Ю. В. (2013). Сортові особливості технології вирощування льону олійного в умовах Полісся. *Луб'яні та технічні культури*, 5, 62–70.
3. Дмитренко, Т. Ф. (2009). Особливості росту льону олійного та льону-довгунця в умовах Полісся. *Збірник наукових праць Інституту луб'яних культур*, 5, 106–113.
4. Сай, В. А., Дідук, В. Ф., & Тараймович, І. В. (2009). Перспективи вирощування льону олійного у Волинській області. *Легка промисловість*, 3, 10–11.
5. Інститут луб'яних культур НААН. (2019). *Льонарство в Україні: технології вирощування та переробки*. Глухів: ІЛК НААН.
6. Онищук, Ю. М. (2018). *Машини та обладнання для первинної переробки луб'яних культур*. Луцьк: ЛНТУ.
7. Кривонос, І. А., & Зубченко, О. В. (2016). Механічна переробка луб'яних культур: сучасний стан і перспективи. *Інженерія природокористування*, 1(5), 34–41.
8. ДСТУ 7670:2014. (2014). *Льон. Воловина тріпана. Технічні умови*. Київ: Держспоживстандарт України.
9. Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibers tensile behavior and multi-scale modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939–948.
10. Bourmaud, A., Le Duigou, A., Gourier, C., Baley, C., & Shah, D. (2018). Impact of the processing on the mechanical behavior of flax fibers. *Industrial Crops and Products*, 113, 225–233.
11. Holst, N. (2018). Flax fibre decortication: Processing technologies and challenges. *Industrial Crops and Products*, 118, 30–41.
12. Dvorak, Z., & Kafkova, J. (2020). Mechanical decortication of flax stalks using roller systems. *Journal of Natural Fibers*, 17(5), 673–685.
13. Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Flax and hemp fibers for insulation materials. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523.
14. Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2015). Flax fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 155–166.
15. Summerscales, J., Dissanayake, N., Virk, A., & Hall, W. (2010). A review of bast fibres and their composites: Part 1 – Fibres as reinforcements. *Composites Part A*, 41(10), 1329–1335.

- 16.Kozłowski, R., & Motaleb, K. (2012). *Handbook of Natural Fibres* (Vol. 1). Cambridge: Woodhead Publishing.
- 17.Shah, D. (2013). Damage tolerance in natural fibre composites. *Composites Science and Technology*, 87, 147–153.
- 18.Talla, A., Bensadoun, F., Verpoest, I., & Van Vuure, A. W. (2015). Influence of humidity on flax fiber tensile properties. *Journal of Materials Science*, 50, 4033–4043.
- 19.Liu, L., Zhang, J., & Wang, Y. (2020). Optimization of mechanical decortication parameters for bast fibers. *Fibers and Polymers*, 21(1), 110–119.
- 20.Shahzad, A. (2012). Hemp fiber decortication using crushing rollers and knife mills. *BioResources*, 7(4), 5811–5825.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Відповідність натуральних і кодованих значень факторів

Фактор	Найменування	-1	0	+1
X ₁	Частота обертання валів, об/хв	60	90	120
X ₂	Вологість стебел, %	12	16	20
X ₃	Послідовність вальцових блоків	Т-Е-Ц	Е-Ц-Т	Ц-Т-Е

Фактор X₃ є якісним (категоріальним) і використовується для порівняльного аналізу впливу різних конфігурацій очисних блоків на показники процесу очищення.

Таблиця А.2 – Кодована матриця повного трирівневого плану експерименту 3³

№ досліду	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0

№ досліду	X_1	X_2	X_3
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

№ варіанта	Профіль першого блоку	Профіль другого блоку	Профіль третього блоку	Кількість повторів
1	T	E	Ц	3
2	E	Ц	T	3
3	Ц	T	E	3
4	T	T	T	3
5	E	E	E	3
6	Ц	Ц	Ц	3

ВИХІДНІ ДАНІ

◆ ТЕМА

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ВОЛОКНА ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО З УДОСКОНАЛЕННЯМ ОЧИСНИХ ВАЛЬЦІВ

◆ МЕТА

Мета роботи – підвищення ефективності процесу отримання волокна льону олійного шляхом удосконалення конструкції очисних вальців та оптимізації їх технологічних параметрів.

◆ ЗАДАЧІ

- Провести огляд літературних джерел і проаналізувати існуючі технології та машини для переробки льоноволокнистої сировини.
- Дослідити фізико-механічні властивості стебел льону олійного, що впливають на процес декортикації та очищення.
- Обґрунтувати конструкцію удосконалених очисних вальців та визначити їх раціональні геометричні параметри.
- Розробити методику експериментальних досліджень для оцінки якості отриманого волокна та енергетичних показників процесу.
- Провести експериментальні дослідження роботи очисних вальців з різними параметрами профілю і міжвальцевого зазору.
- Встановити оптимальні технологічні режими очищення волокна та дати практичні рекомендації щодо застосування модернізованих вальців у виробництві.

◆ ВЛАСТИВОСТІ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ

Вид – льон олійний (солома, треста)

Показник	Значення
Вологість	12...20 %
Діаметр стебел	нерівномірний
Вміст лубу	20–30 %
Частка костриці	70–80 %
Механічні властивості	підвищена крихкість костриці
Стан	після збирання та підсушування

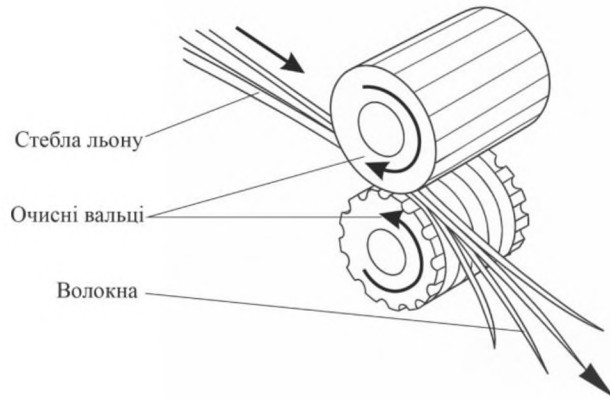
◆ ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ

- недопущення надмірного травмування волокна;
- забезпечення стабільного проходження матеріалу;
- мінімізація намотування та забивання валів.

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЛУБ'ЯНИХ ВОЛОКОН

СХЕМА ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ

Контактна взаємодія, зсув і вигин стебел у вальцьовому зазорі.



СТАБІЛЬНІСТЬ ЗАЗОРУ

Фактичний зазор між валами

$$h = h_0 + \Delta h_p - \Delta h_m$$

Умова стабільної роботи та зниження травмування волокна

$$|\Delta h_p - \Delta h_m| < 0.1 \text{ мм}$$

ПРОФІЛІ ВАЛІВ

Циліндричний,

евольвентний,

трикутний

КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ

Сила стискання стебла у вальцьовому зазорі.

$$F_c = k_s \Delta h$$

Питомі контактні напруження у зоні фактичного контакту.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c}$$

ЕНЕРГІЯ РУЙНУВАННЯ

$$E = \int_0^l F_t dx$$

Спрощений вираз для випадку рівномірного навантаження:

$$E = F_t \cdot l$$

МОДЕЛЬ ГЕРЦА

$$\sigma = \sqrt{\frac{FE'}{\pi R'}}$$

ІНТЕГРАЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ

$$\Phi = \alpha K_c + \beta(1 - P_{me}) + \gamma P_{оч}$$

ЗСУВОВЕ РУЙНУВАННЯ

Зсувові напруження у зоні руйнування костриці

$$\tau = \frac{F_t}{A_s}$$

Різниця окружних швидкостей валів.

$$\Delta v = v_1 - v_2$$

Умова ефективного руйнування костриці без руйнування волокна.

$$\tau_k < \tau < \tau_v$$

САМООЧИЩЕННЯ ПРОФІЛЮ

$$K_c = \frac{V_v}{V_n}$$

$$K_c \geq 1$$

ЗБЕРЕЖЕННЯ ВОЛОКНА

$$\tau < \tau_v, \sigma < \sigma_v$$

$$\sigma_v = 80 - 120 \text{ МПа}, \quad \tau_v = 20 - 35 \text{ МПа}$$

АПАРАТУРА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Розсів лабораторний РЛУ-3К



Двоколонний тестер текстильних матеріалів Chiuvention



Електронний штангенциркуль



**Електронні ваги високої точності 0,001г
Digital Scales Gem-50-1**

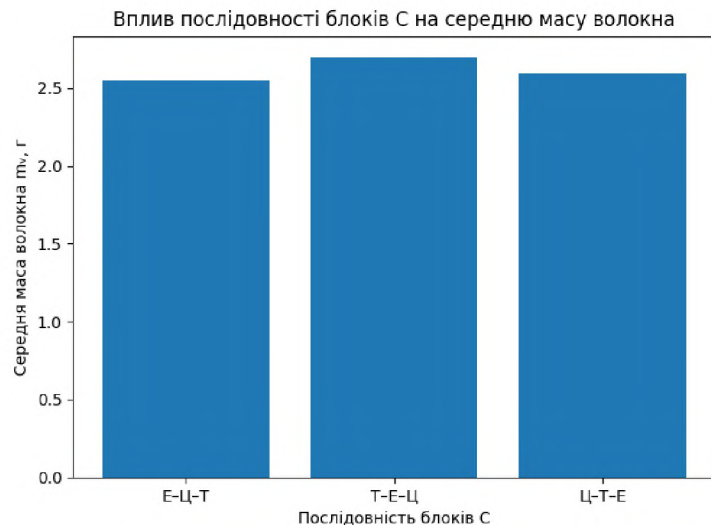


Вологомір-термощуп SuperPro Combi

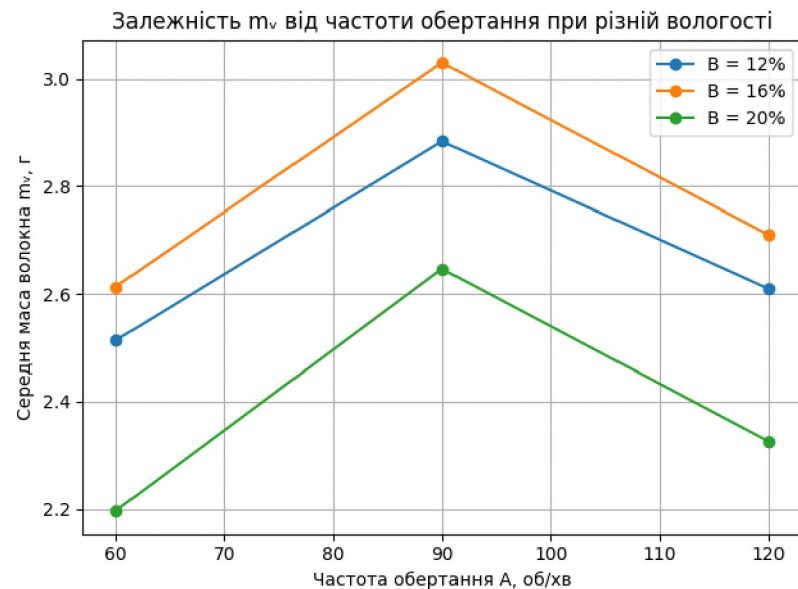
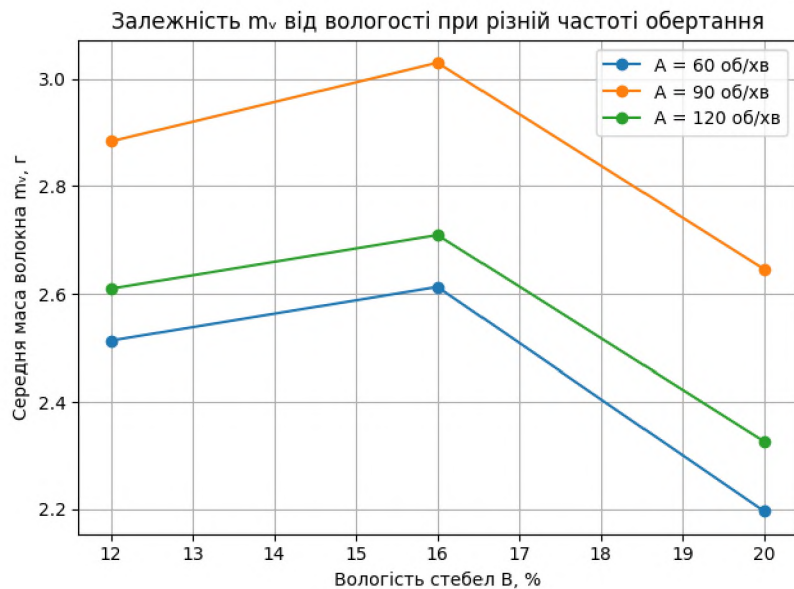


Шафа сушильна СЕШ-3МК

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Вплив послідовності профілів вальців на масу очищеного волокна



Вплив вологості стебел на вихід волокна при різних частотах обертання

Залежність виходу волокна від частоти обертання валів при різній вологості сировини

ПЛАНУВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1) Кодування факторів

$x_1 = (A - 90) / 30$, де A – частота обертання, об/хв (60; 90; 120).

$x_2 = (B - 16) / 4$, де B – вологість, % (12; 16; 20).

x_3 – код послідовності блоків: Т-Е-Ц = -1; Е-Ц-Т = 0; Ц-Т-Е = +1.

2) Рівняння регресії у кодованих значеннях

$$m_v = 3.023 + 0.0539 \cdot x_1 - 0.1394 \cdot x_2 - 0.0522 \cdot x_3 + 0.0083 \cdot x_1 x_2 + 0.0017 \cdot x_1 x_3 + 0.0025 \cdot x_2 x_3 - 0.3583 \cdot x_1^2 - 0.2550 \cdot x_2^2$$

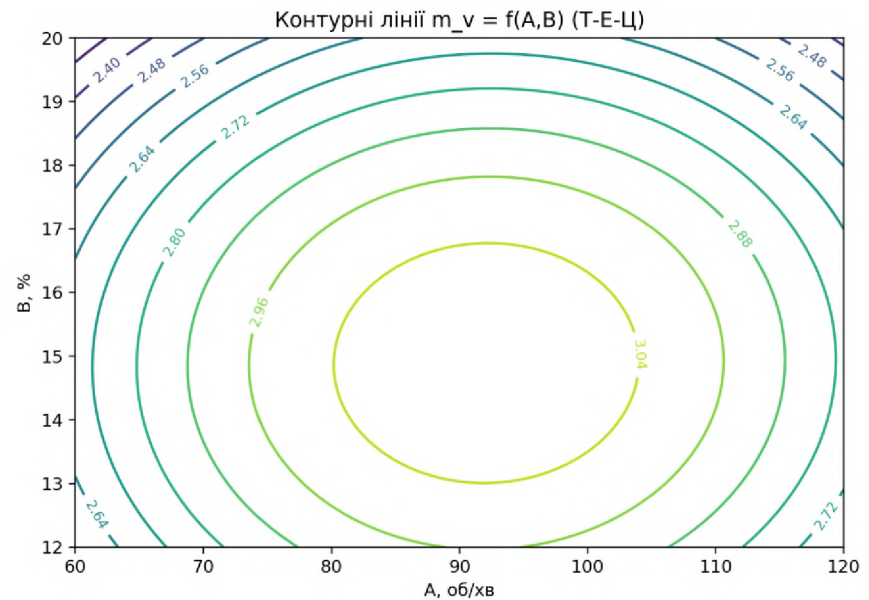
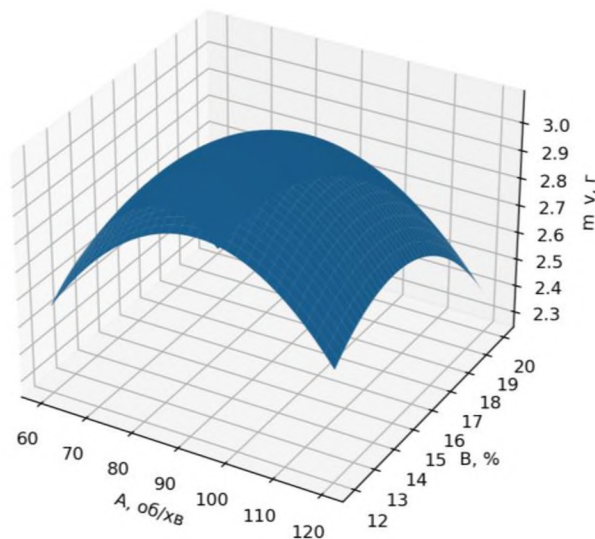
3) Коефіцієнти моделі (кодовані)

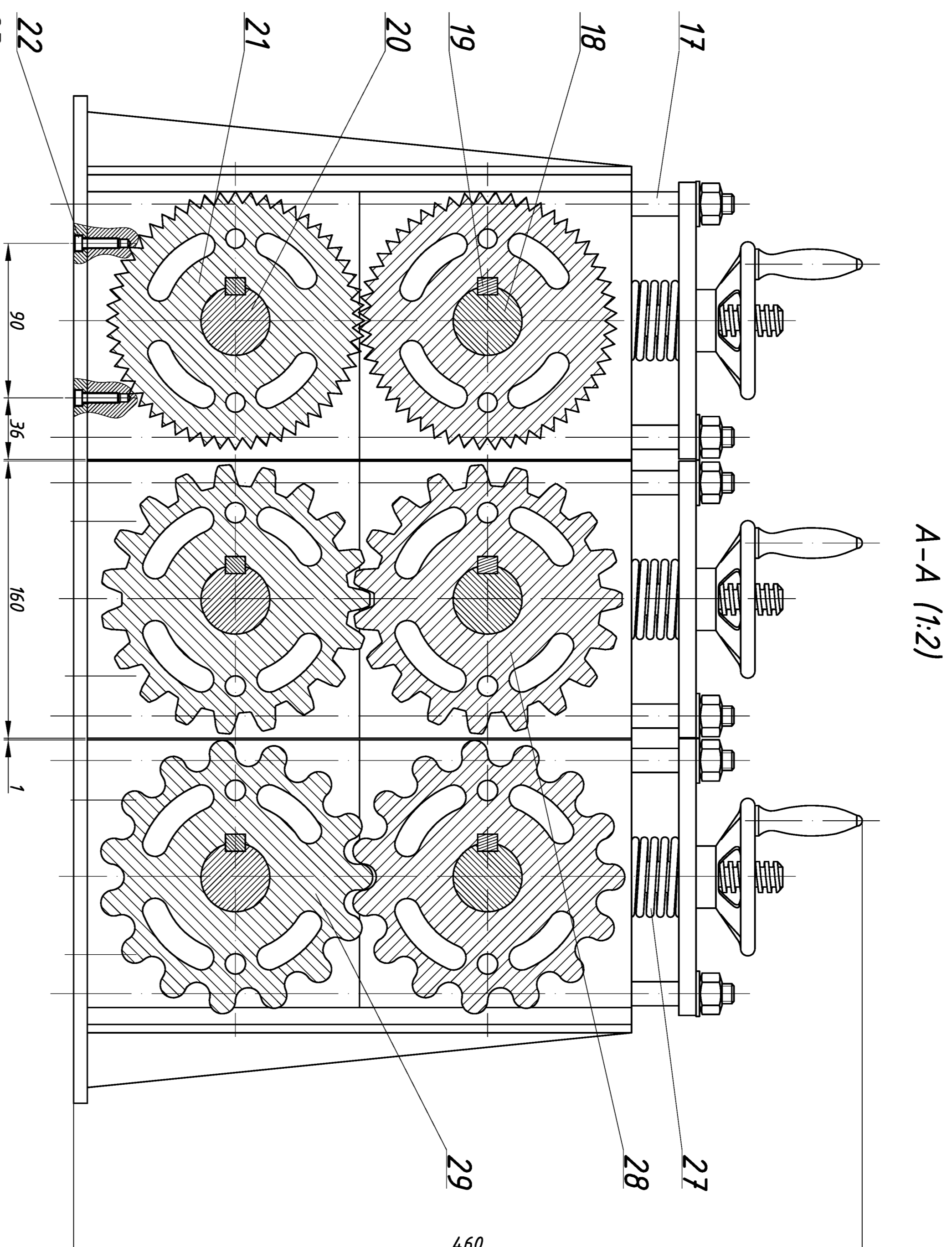
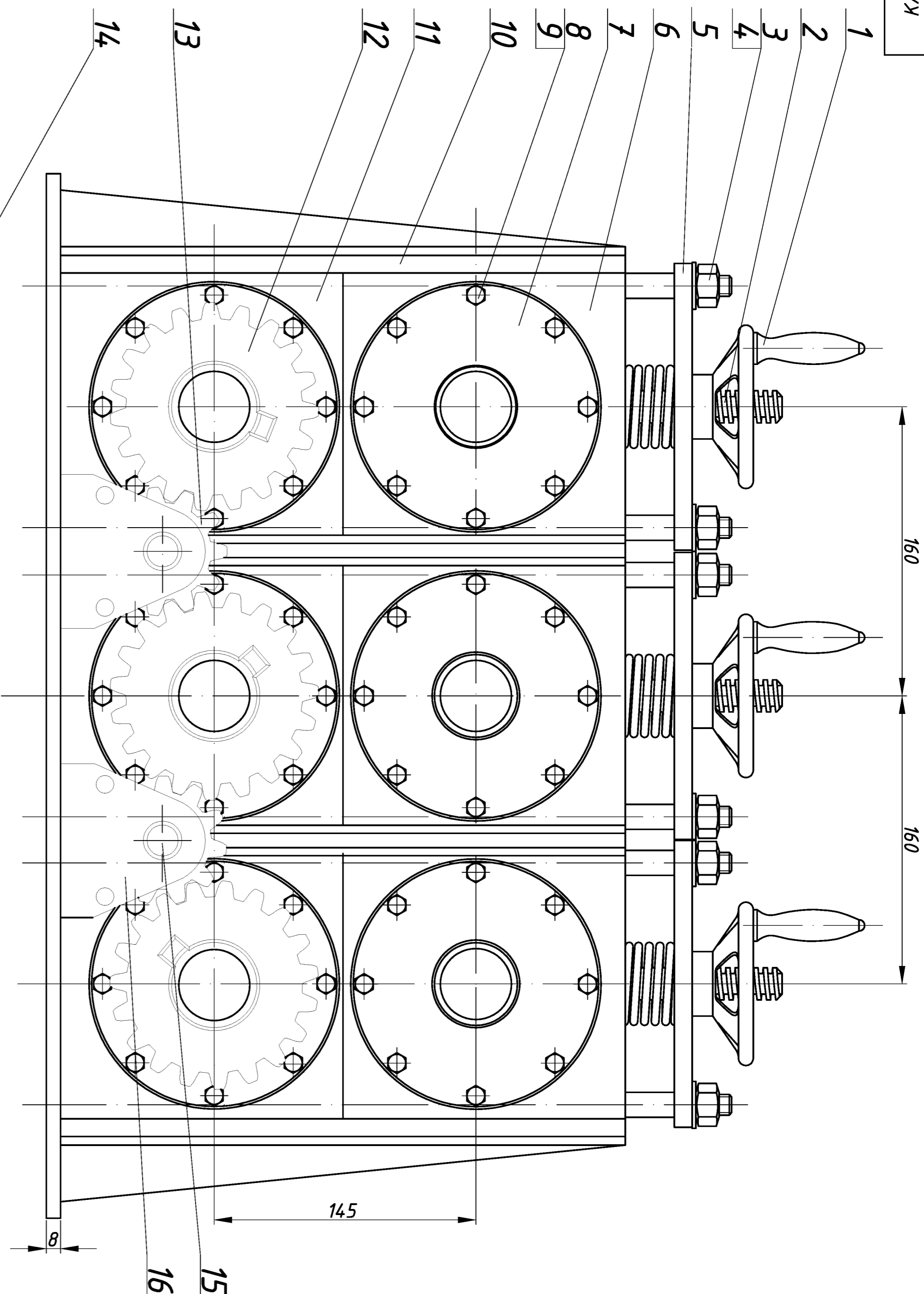
b0	3.0230	b1	0.0539
b2	-0.1394	b3	-0.0522
b12	0.0083	b13	0.0017
b23	0.0025	b11	-0.3583
b22	-0.2550		

Конфігурація для графіків: Т-Е-Ц ($x_3 = -1$).

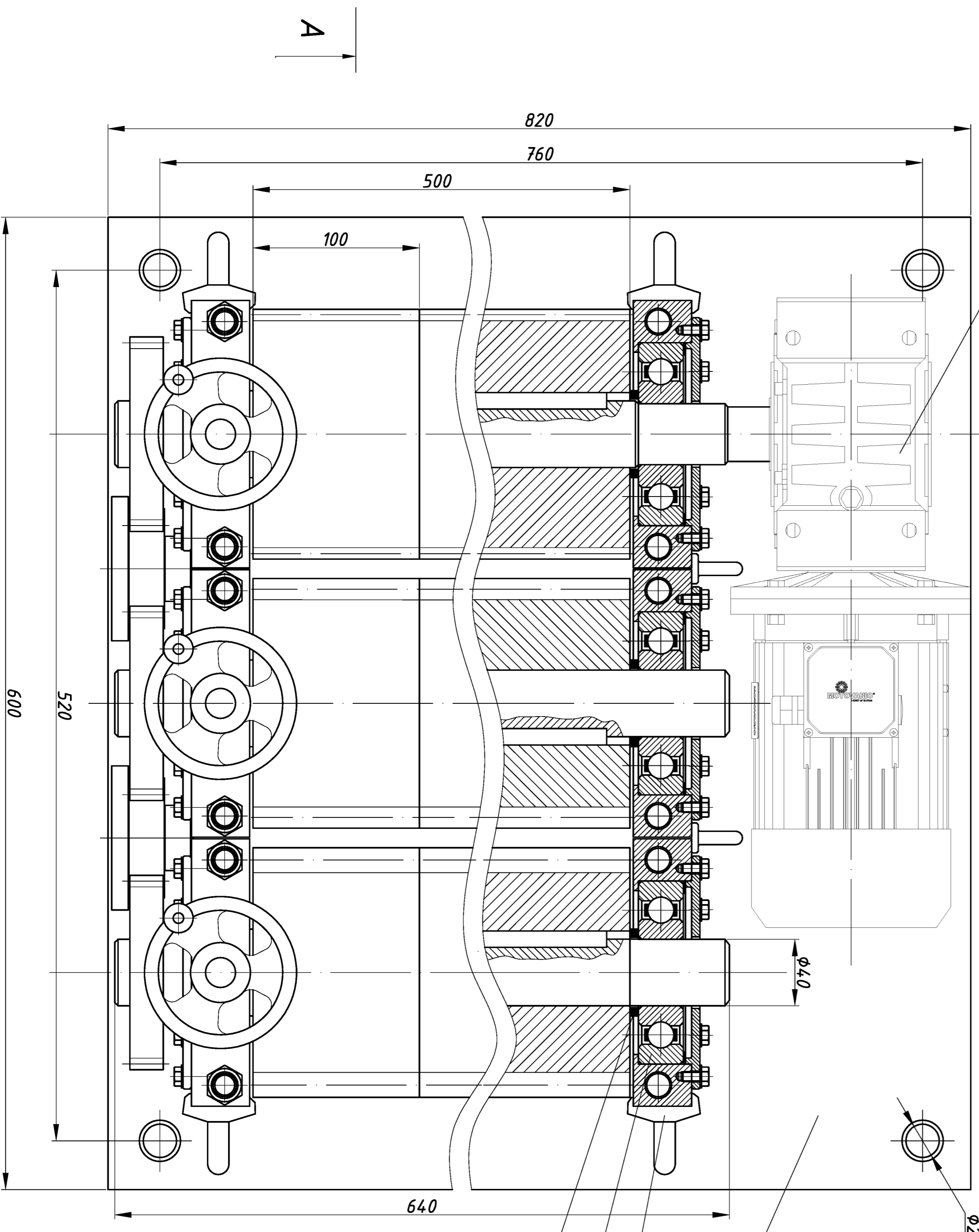
4) Графіки поверхні відгуку $m_v = f(A, B)$

Поверхня відгуку $m_v = f(A, B)$ для послідовності Т-Е-Ц





A-A (1:2)

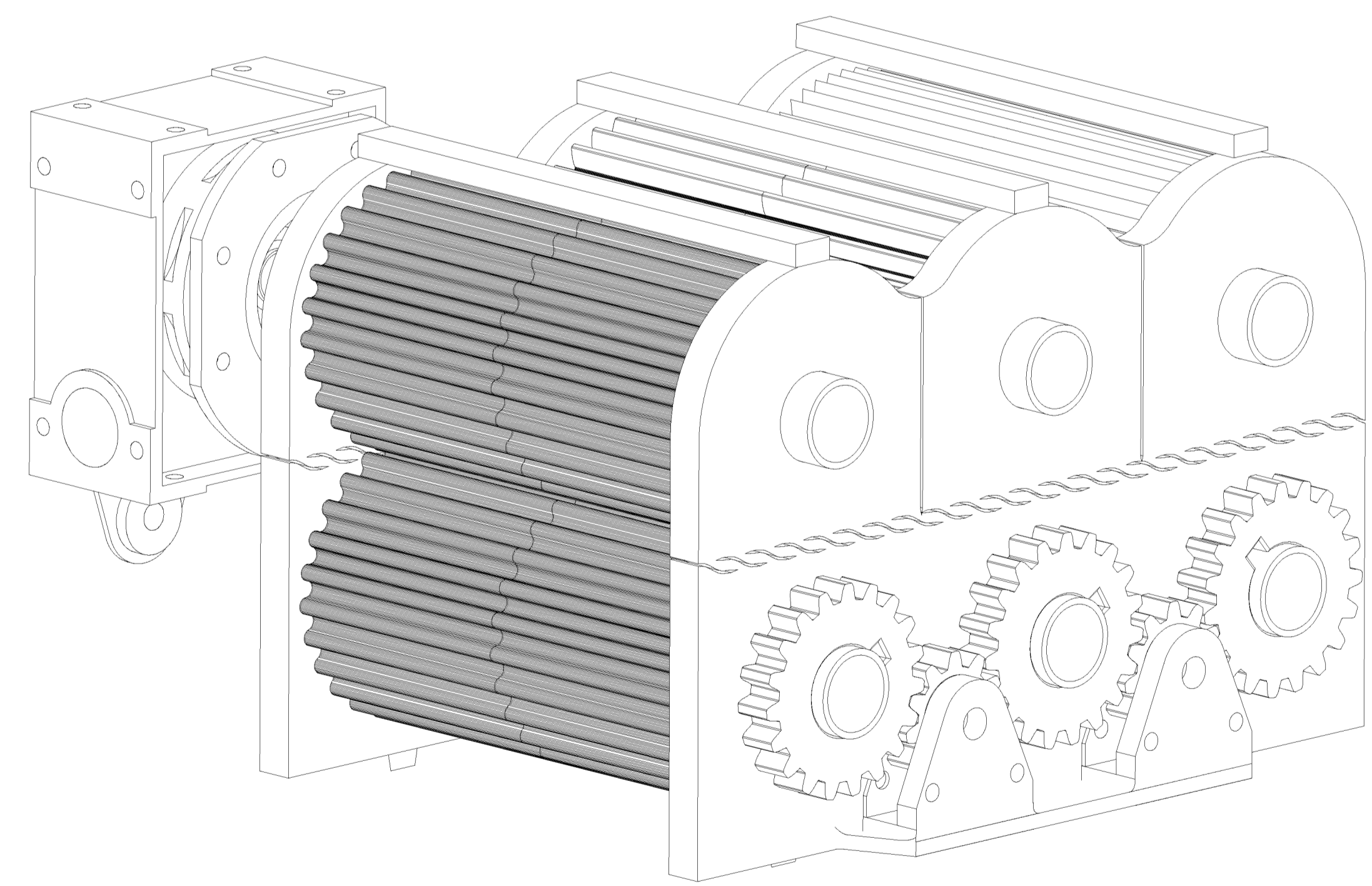
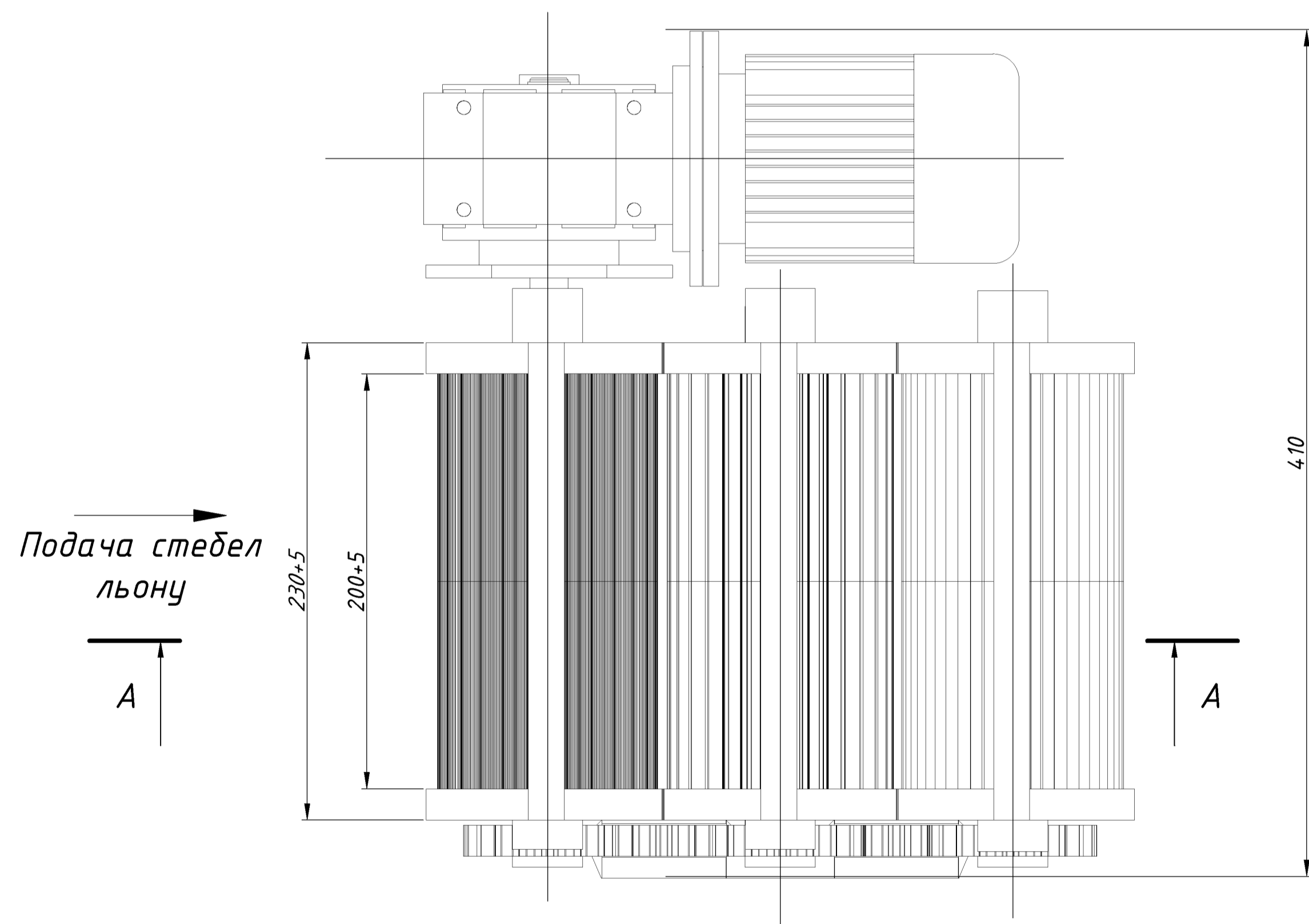
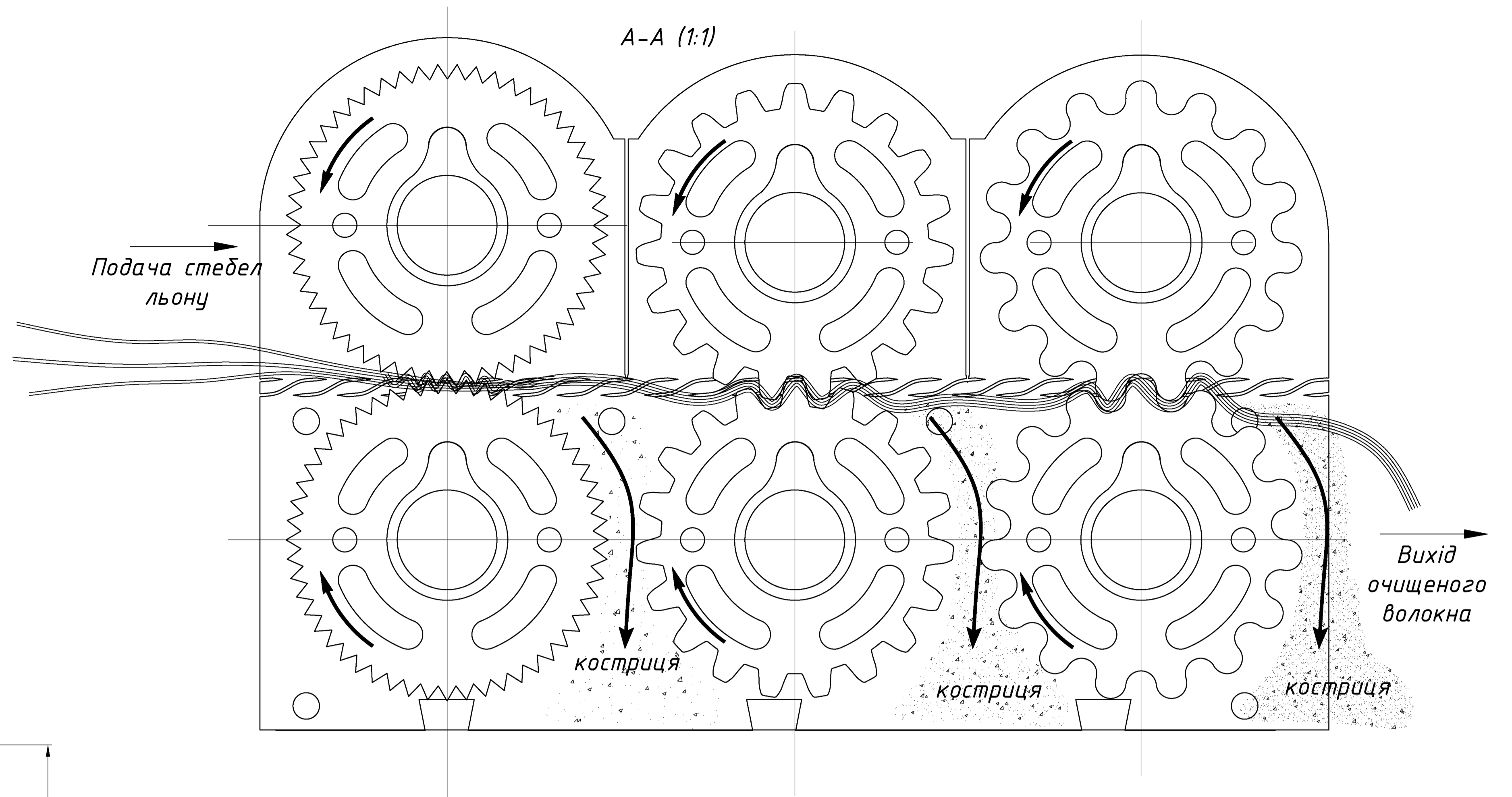
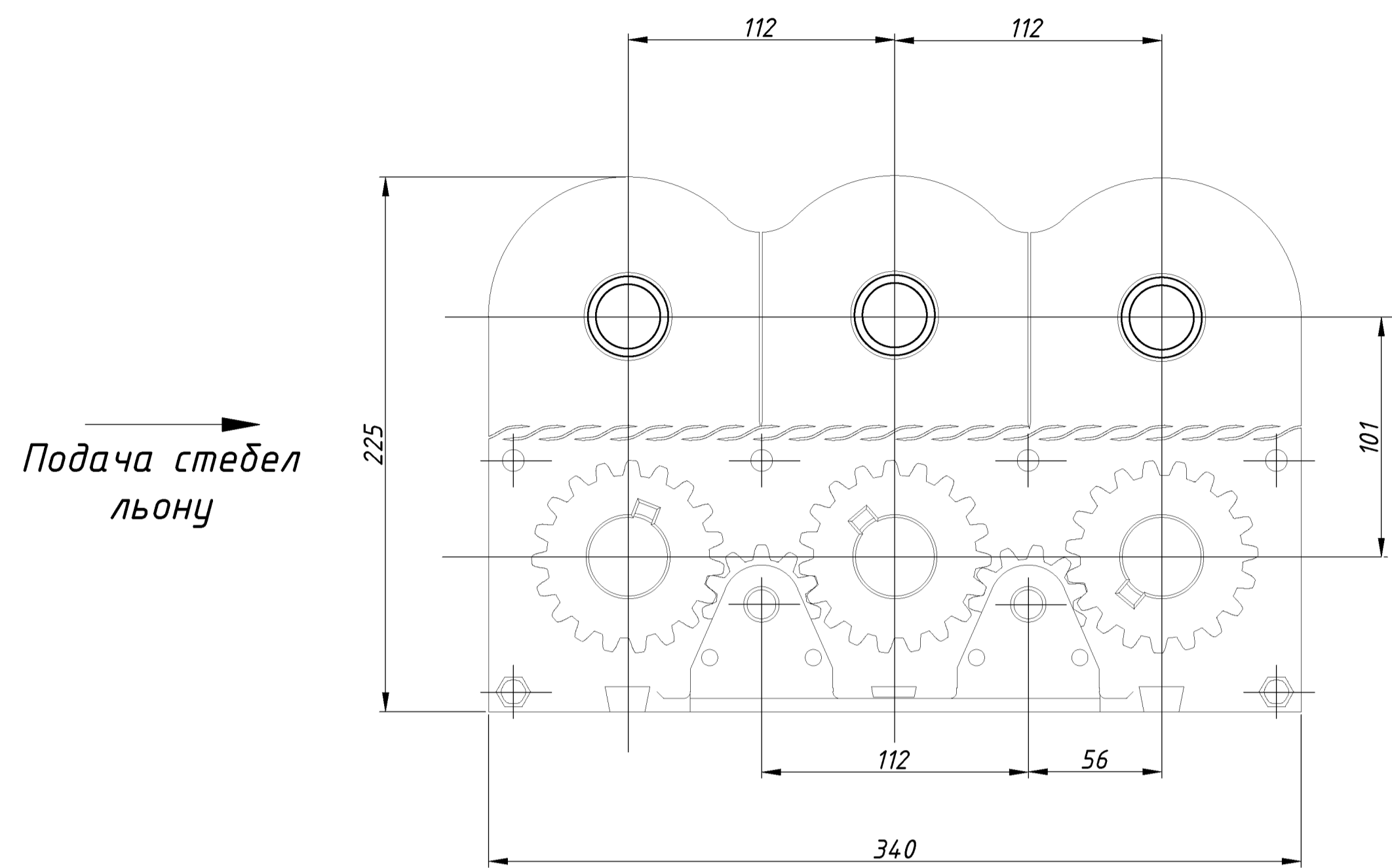


Технічні характеристики

Вага, кг	~ 55;
довжина, м	~ 0,82;
ширина, м	~ 0,6;
висота, м	~ 0,46;
робоча ширина, м	~ 0,5;
потужність, кВт	1,0;
привід робочих органів	електричний;
продуктивність, т/год	0,2;
частота обертання заднього органу, хв ⁻¹	85...95;

1. Місця змащування повинні бути позначені згідно ГОСТ 12.2.111-85.
2. * Розміри для довідок

КА1.ОР0.00.00.0000.03			
Зм. Дак.	№ док.	Підпис	Дата
Розроб.	Гачка		
Лектор	Калюшаків		
Технік			
Начальн.	Вихучук		
Замовл.	Хонч		
Механізм очисних валів		Літера	Маса
Схема принципова		Д	55 кг
		Архив	Архив
		ЛНТУ, КА1	



КАІ.ОР0.00.00.0000.02				Літера	Маса	Мірило
Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Д	12 кг	1:2
Розроб.	Сачко			Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Хлопецький			ЛНТУ, каф КАІ,		
Т.контр.				АІМ-21		
Н.контр.	Юхимчук			--		
Затверд.	Хомич					