

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка автоматизованого комплексу для переробки текстильних відходів

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТмз-24-1



Підпис

Дегтяренко В.С.

Ініціали, прізвище

Керівник

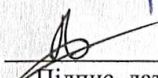


Підпис, дата

проф., д.т.н. Синюк О.М.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

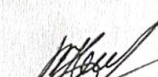


Підпис, дата

С.І. Пундик

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:



Підпис, дата

доц., к.т.н. Неймак В.С.

Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва


Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доцент Неймак В.С.

 12.2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Дегтяренка Володимира Сергійовича

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка автоматизованого комплексу для переробки текстильних відходів

Керівник роботи д.т.н., проф. Синюк О.М.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Розробка автоматизованого комплексу для переробки текстильних відходів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд обладнання і досліджень в галузі переробки відходів.

2. Аналіз математичних моделей процесів механічної утилізації відходів.

3. Експериментальні дослідження процесів утилізації та транспортування

відходів. 4. Використання результатів досліджень у проектуванні

подрібнювача та голкофрезового обладнання. Висновки. Перелік джерел

посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Пристрій попереднього подрібнення. Складальне

креслення (A1). Аркуш 2. Пристрій попереднього подрібнення. Деталювання.

(4*A3). Аркуш 3. Барабан. Складальне креслення (A1). Аркуш 4. Барабан.

Деталювання (4*A3). Аркуш 5. Пристрій для подрібнення волокнистих

матеріалів. Складальне креслення (A1). Аркуш 6. Пристрій для подрібнення

волокнистих матеріалів. Деталювання (4*A3).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

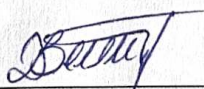
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз обладнання і досліджень у галузі утилізації відходів	до 15.10.25р.	
2. Аналіз процесів механічної утилізації відходів	до 30.10.25р.	
3. Розробка конструкції подрібнюючого пристрою	до 5.11.25р.	
4. Проведення експериментальних досліджень	до 20.11.25р.	
5. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.25р.	

Студент

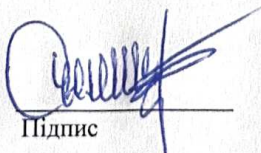


Підпис

В.С. Дегтяренко

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

О.М. Синюк

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Дегтяренко Володимир Сергійович
2. Тема магістерської роботи Дослідження каскадної системи охолодження електропобутового пристрою на основі термоелектричного ефекту
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 70 стор.

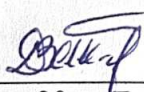
5. Дипломна робота присвячена дослідженню процесів утилізації та транспортування відходів з метою підвищення ефективності їх механічної переробки та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів обладнання для утилізації полімерних і волокнистих відходів.

У розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні теоретичні та експериментальні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

У першому розділі виконано аналіз сучасних способів і технічних засобів утилізації відходів, а також розглянуто математичні моделі процесів механічної утилізації у різноманітних подрібнювальних та транспортуючих пристроях. Проведено огляд наукових досліджень у галузі переробки відходів та визначено основні напрямки підвищення ефективності відповідних технологічних процесів.

У другому розділі наведено методику експериментальні дослідження процесів утилізації волокнистих відходів у голкофрезовому подрібнювачі. Здійснено планування експерименту, обґрунтовано вибір факторів та рівнів їх варіювання. Наведено опис експериментальних установок та визначені показники ефективності процесу утилізації. Визначено показники, що характеризують процес транспортування та проведено експериментальні дослідження з метою встановлення оптимальних режимів роботи обладнання.

У роботі наведено рекомендації щодо застосування обладнання для утилізації полімерних і волокнистих відходів, а також показано використання отриманих результатів під час проектування голкофрезового обладнання. Зроблено висновки щодо доцільності впровадження досліджених технічних рішень у практику переробки відходів.

Підпис студента 
« 10 » 12 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК

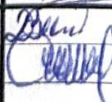


Протокол 6 від « 30 » 12 2025 р.
Оцінка проекту ЕК добре / С / 70
Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____
Технічний секретар Гурек А.В. Гур

« 30 » 12 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ І ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ..	9
1.1 Аналіз способів та пристроїв для утилізації відходів.....	9
1.2 Аналіз математичних моделей процесів механічної утилізації відходів в різноманітних пристроях	20
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВІДХОДІВ	33
2.1 Об'єкти та методика експериментальних досліджень процесу утилізації	33
2.1.1 Опис експериментальної установки	33
2.1.2 Показники ефективності процесу утилізації	36
2.1.3 Визначення факторів, що впливають на процес утилізації.....	38
2.2 Дослідження процесу утилізації волокнистих відходів у голкофрезовому подрібнювачі.....	38
2.2.1 Планування експерименту.....	39
2.2.2 Значення факторів і рівні їх зміни.....	41
2.3 Об'єкти та методика експериментальних досліджень	48
2.3.1 Опис експериментальної установки.....	49
2.3.2 Визначення показників, що характеризують процес транспортування в каналі подрібнювача.....	50
2.4 Визначення факторів процесу транспортування.....	51
2.5 Дослідження процесу транспортування.....	51
2.5.1 Планування експерименту	51
2.5.2 Фактори та рівні їх варіювання.....	52
2.6 Застосування обладнання для утилізації полімерних і волокнистих відходів	55
2.7 Використання результатів досліджень у проектуванні голкофрезового обладнання	56
ВИСНОВКИ.....	59

МРМА25.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	
		Дегтяренко			Розробка автоматизованого комплексу для переробки текстильних відходів Пояснювальна записка
		Синюк О.			
		Неймак			Літера М
					Аркуш 4
					Аркушів 70
					ХНУ гр.ЕТмз-24-1

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	61
ДОДАТОК А.....	66
ДОДАТОК Б.....	68
ДОДАТОК В.....	70

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

5

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ВСТУП

Сучасний стан розвитку легкої промисловості потребує впровадження нових технологій інтенсифікації виробничих процесів для швидкого поліпшення якості продукції, її кількості та асортименту.

Розвиток виробництва веде до збільшення кількості відходів, які через малу площу поверхні не використовуються за прямим призначенням, і перед підприємствами постає проблема утилізації та переробки відходів виробництва. Причому проблема відходів має не тільки економічне, але і екологічне значення, так як недосконалі технології утилізації практично усіх видів відходів ведуть до забруднення навколишнього середовища. Основними відходами підприємств легкої промисловості є гума, полімери, текстиль, натуральні та штучні шкіри, хутро та комбінації з цих матеріалів. Ці відходи дуже погано піддаються природним процесам розпаду, а деякі з них зовсім не піддаються, і при їх спаленні забруднюється навколишнє середовище.

В наш час в усіх галузях виробництва набувають все більшого використання вироби з комбінованих та дубльованих матеріалів. Деталі із цих матеріалів виготовляються шляхом розкрою листових заготовок, після чого залишається велика кількість відходів, які в подальшому не використовуються, тому що існуючі технології та обладнання [54,59,71,85] не дозволяють переробляти комбіновані і дубльовані відходи.

Відомі технології дозволяють подрібнювати відходи за допомогою різноманітних механічних пристроїв, і подальше використання подрібнених відходів залежить від ступеня їх дисперсності [42,53,57,59].

Так, для неволокнистих матеріалів вважається кращим мілко дисперсне подрібнення, а для волокнистих матеріалів – збереження максимальної довжини волокна. Від цього залежить діапазон їх використання [79,80,88,92].

Найбільш важливим питанням переробки (утилізації) відходів шляхом подрібнення є вибір способу подрібнення та обладнання для його реалізації. Вихо-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дячи з вимог, які ставляться перед обладнанням, необхідно враховувати і його економічність.

Процес подрібнення різноманітних матеріалів може бути використаний у багатьох галузях промисловості, де є відходи текстилю, полімерів, гуми, шкіри, хутра.

Існуючі подрібнювальні пристрої здебільшого використовують механічні засоби подрібнення, такі як різання, стирання, плющення матеріалу. При цьому ці пристрої не враховують фізико-механічних властивостей подрібнювальних матеріалів та конкретних умов переробки, що приводить до збільшення енергоємності процесу подрібнення.

Створення високоефективних механічних подрібнювальних пристроїв, які максимально враховують особливості фізико-механічних властивостей матеріалів, що подрібнюються, є актуальним завданням і представляє цікавість для багатьох галузей промисловості, так як максимальне використання відходів виробництва в сучасних умовах є важливим додатковим джерелом сировини.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси та технічні засоби, призначені для механічної утилізації відходів волокнистих матеріалів легкої промисловості.

Метою роботи є створення та виготовлення експериментальної установки для переробки текстильних відходів у волокна наперед заданої довжини. Для досягнення цієї мети передбачено: розроблення методики експериментальних досліджень впливу швидкості деформування матеріалу, швидкості його транспортування, температурного режиму та довжини каналу подачі відходів на формування волокон; а також створення інженерної методики проектування пристроїв для утилізації текстильних і шкіряних відходів.

Методологічну основу дослідження становлять сучасні математичні методи, зокрема метод кінцевих елементів, а також досягнення в галузі технологій переробки відходів. У процесі аналізу експериментальних даних широко застосовувалися методи теорії ймовірностей, математичної статистики, кореляційного та регресійного аналізу.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У межах роботи розроблено та науково обґрунтовано метод експериментального дослідження параметрів технологічного процесу механічної утилізації текстильних матеріалів. Спроектовано та виготовлено голкофрезний пристрій, на якому проведено експериментальні дослідження процесу подрібнення та формування волокон із відходів полімерного і текстильного походження.

Запропоновано інженерну методику проектування обладнання для утилізації відходів текстильного та шкіряного виробництва, яка враховує тип перероблюваного матеріалу й конкретні умови реалізації технологічного процесу. На основі цієї методики визначено оптимальні геометричні параметри робочого інструменту, зокрема кут загострення, форму та радіус заокруглення елементів, що безпосередньо контактують з матеріалом. Також встановлено раціональні технологічні параметри процесу, зокрема швидкість взаємодії робочого органу з матеріалом, за яких досягається зниження енергоспоживання до 10 % при збереженні високої якості переробки (довжина отриманих волокон становить 6–14 мм).

Відповідно до визначених параметрів спроектовано та виготовлено дослідний зразок подрібнювача, призначеного для утилізації волокнистих відходів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ І ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ

1.1 Аналіз способів та пристроїв для утилізації відходів

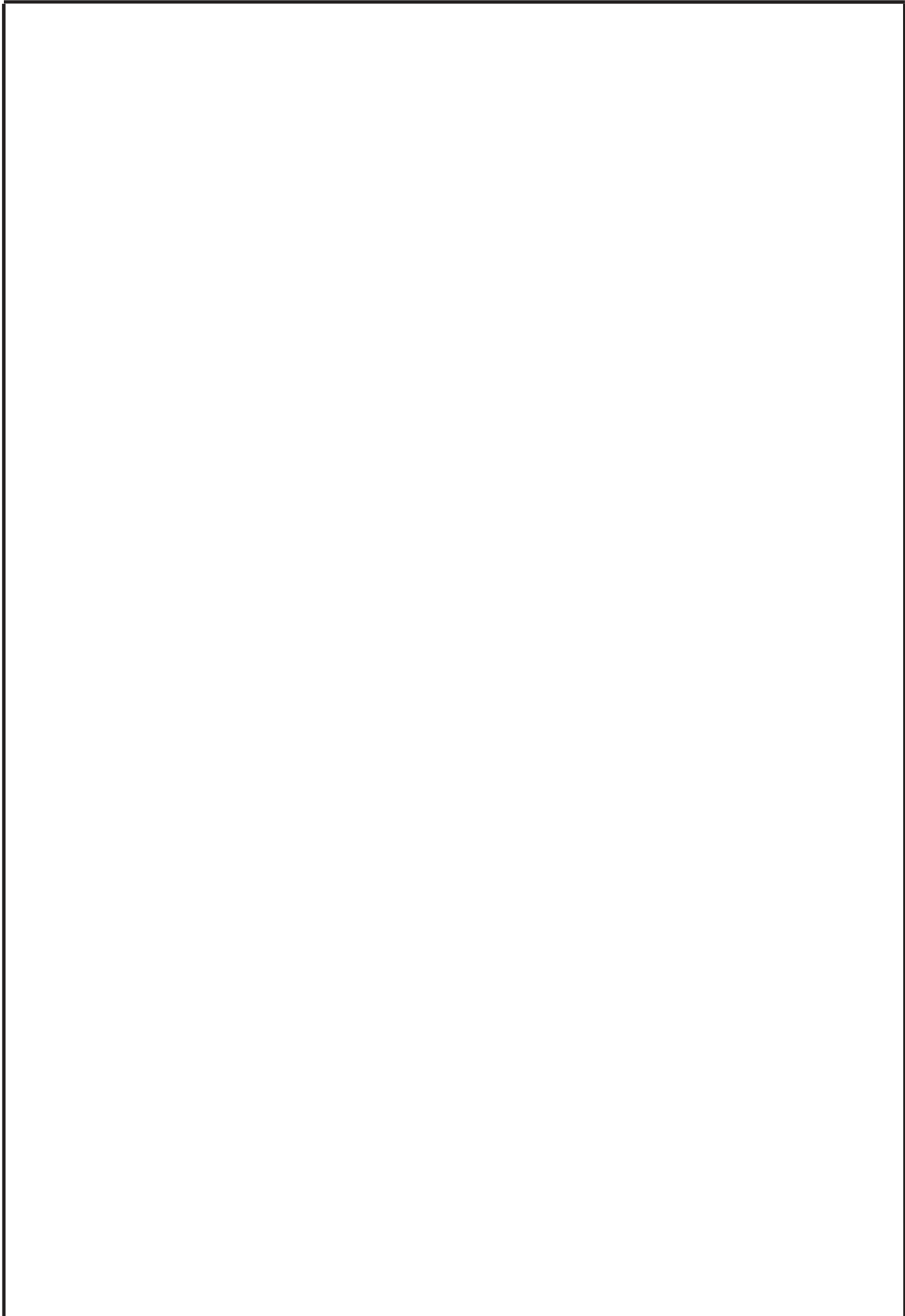
Для отримання відповідної форми та дисперсності відходів матеріал проходить різноманітні стадії подрібнення. З урахуванням потреб виробництва обладнання для утилізації відходів повинно бути високопродуктивним, надійним в експлуатації, характеризуватися найменшими питомими витратами енергії і забезпечувати необхідний ступінь подрібнення.

В залежності від ступеня подрібнення матеріалів машини підрозділяються на дробила та млини, які забезпечують дроблення велике (розмір часток після подрібнення від 80 мм до 200 мм), середнє (від 20 мм до 80 мм) і мілке (від 2 мм до 20 мм), та помоли підрозділяють на грубий (розмір часток після помолу від 0,2 мм до 2 мм), тонкий (від 0,01 мм до 0,2 мм) та найтонший (менш 0,01 мм) [42].

Тип обладнання для утилізації відходів вибирається в залежності від величини вихідного матеріалу, його міцності та абразивності, а також від вимог до дисперсності продуктів утилізації і продуктивності. Так, різні дробила дозволяють отримувати певний ступінь дроблення: для шоккових – від 2 до 8; конусних крупного дроблення з крутим конусом – від 3 до 8; для середнього дроблення з пологим конусом – від 2,5 до 6; валкових від 1,5 до 10; для молоткових – від 5 до 30. Для млинів від 10 до 20.

В усіх цих пристроях для утилізації використовуються ті чи інші фізичні ефекти – плющення, стирання, удар, різання, електрогідрравлічні, ультразвукові, температурні, кавітаційні, струминні. В залежності від способу дії на матеріал, що перероблюється, всі подрібнювачі можна розділити на дві основні групи: подрібнювачі з тілами, що подрібнюють і без тіл, що подрібнюють, які в свою чергу ще можливо розділити на групи, в залежності від використання тих чи інших фізичних ефектів (рис. 1.1).

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

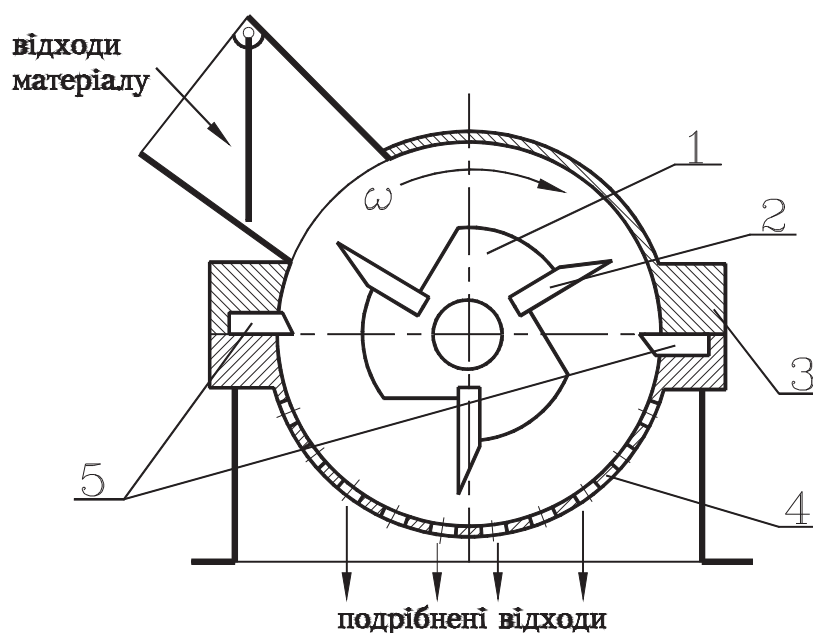
В зв'язку з тим, що дана робота присвячена утилізації відходів текстильних та полімерних матеріалів, то для спрощення подальшого аналізу пристроїв необхідно визначити з загальної кількості органів, що руйнують, ті, які дозволяють найбільш ефективно перероблювати текстильні та полімерні матеріали. Проаналізувавши можливості обладнання, було визначено, що пристрої для утилізації без тіл, які руйнують, а також з вільними тілами які руйнують, не дозволяють ефективно переробляти відходи легкої промисловості тому, що використані в них фізичні ефекти не дозволяють враховувати фізико-механічні властивості волокнистих матеріалів, і це приводить до великих питомих витрат енергії. Тобто, для утилізації цих матеріалів ефективніше застосовувати подрібнювачі з закріпленими тілами, які подрібнюють.

Одним із найпоширеніших способів подрібнення матеріалів є різання. Під час механічного руйнування відходів основна частина витраченої енергії припадає на їх пружну деформацію [81]. Тому з позицій енергоефективності процес утилізації доцільно здійснювати за таких умов, коли деформація матеріалу є мінімальною. Зокрема, під час різання відходів легкої промисловості зона матеріалу, що перебуває у складному напруженому стані, є відносно невеликою і локалізується поблизу ріжучої кромки ножа [48]. Унаслідок цього робота, необхідна для руйнування матеріалу, при різанні істотно зменшується [81,95]. Саме ці переваги зумовили широке впровадження та розширення сфер використання ріжучих механізмів. Залежно від характеру прикладання навантаження розрізняють різання з використанням контрножа (зосереджене різання) та різання без контрножа (незосереджене) [95].

Незосереджений спосіб різання зазвичай застосовують для поділу великогабаритних матеріалів на частини. При цьому обладнання може мати вигляд обертового багатолезового ножа [12,14,28], або ж ніж залишається нерухомим, а обертання здійснює матеріал, що підлягає переробленню [75].

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Зосереджений спосіб різання зазвичай застосовують в роторних пристроях, в яких ножі розміщені як у роторі, так й у статорі (рис. 1.2) [3,7,8,18,25].



1 – ротор; 2 – ніж ротора; 3 – корпус; 4 – решітка; 5 – ножі статора

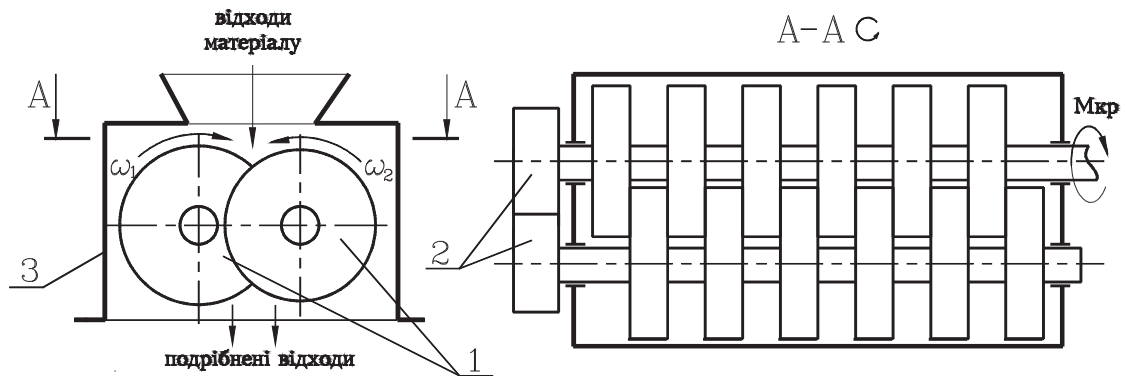
Рисунок 1.2 – Роторний ножовий пристрій для утилізації відходів

Для попередньої переробки текстильних матеріалів ефективними виявились машини з високошвидкісним різанням. Ці машини розрізняються різноманітною конструкцією ротора, розташуванням ножових елементів, способом завантаження матеріалу [8,19]. В наш час створена велика кількість конструкцій комбінованих пристроїв, які використовують для попередньої переробки високошвидкісні ножові елементи [25]. Пристрої такого типу непогано показали себе при подрібненні текстильних виробів [93].

Для виконання операцій первинного подрібнення широко використовують валкові машини, оснащені наборами дискових елементів із ріжучими кромками різної конструкції (рис.3.1). За необхідності підвищення ступеня подрібнення в таких агрегатах застосовують двоетапну схему обробки матеріалу [27,68, 76].

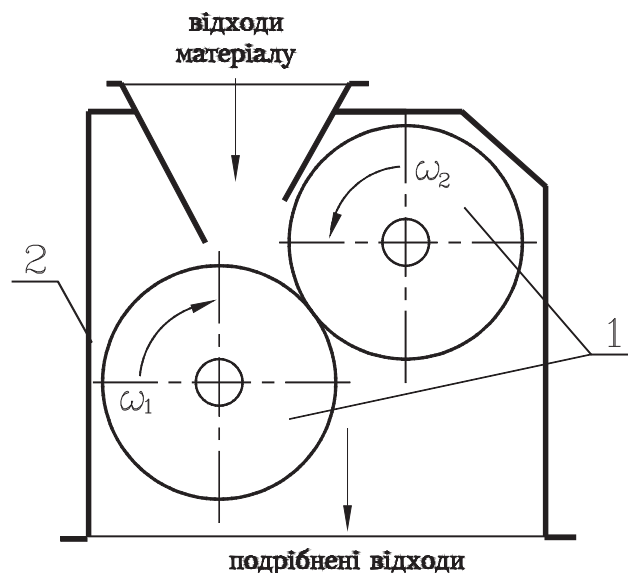
До складу технічних засобів, призначених для утилізації відходів легкої промисловості, також належать валкові подрібнювачі [2,5,6,13].

Руйнування та перероблення матеріалів у цих машинах здійснюється внаслідок дії стискуючих і зсувних напружень, що виникають під час проходження сировини в зазорі між валками (рис. 1.4).



1 – диски; 2 – зубчата передача; 3 – корпус

Рисунок 1.3 – Дисківий подрібнювач для подрібнення відходів



1 – валки; 2 – корпус

Рисунок 1.4 – Валковий подрібнювач для утилізації відходів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
13

Рівень стискуючих зусиль у валкових механізмах визначається величиною зазору між валками, тоді як інтенсивність зсувних деформацій зумовлюється умовами контакту та взаємного переміщення матеріалу. За конструктивним виконанням валкові подрібнювачі можуть містити один або кілька валків, які здатні обертатися як синхронно в одному напрямку, так і назустріч один одному.

З урахуванням механічних властивостей оброблюваного матеріалу та необхідного ступеня його руйнування робочі поверхні валків виконують з різною геометрією: від гладкої до рифленої, ребристої або зубчастої.

Для підвищення ефективності процесу подрібнення також застосовують валки спеціальної форми. Зокрема, робочі органи можуть бути виготовлені у вигляді системи взаємно зміщених усічених конусів [2,5], а також у формі окремих сегментів тора [6,4].

Враховуючи відносну простоту і надійність роботи валкових млинів, а також можливість зміни зазору між валками, вони отримали широке розповсюдження на Україні і в усьому світі.

При утилізації відходів в останній час широке застосування отримали черв'ячні подрібнювачі. Ці пристрої використовуються здебільшого для переробки гуми у високоеластичному стані [94], що можна охарактеризувати як пружно-деформаційний. Суть цього способу полягає у використанні поля механічних сил, при якому матеріал підлягає стисненню зі зсувом (рис. 1.5) [15].

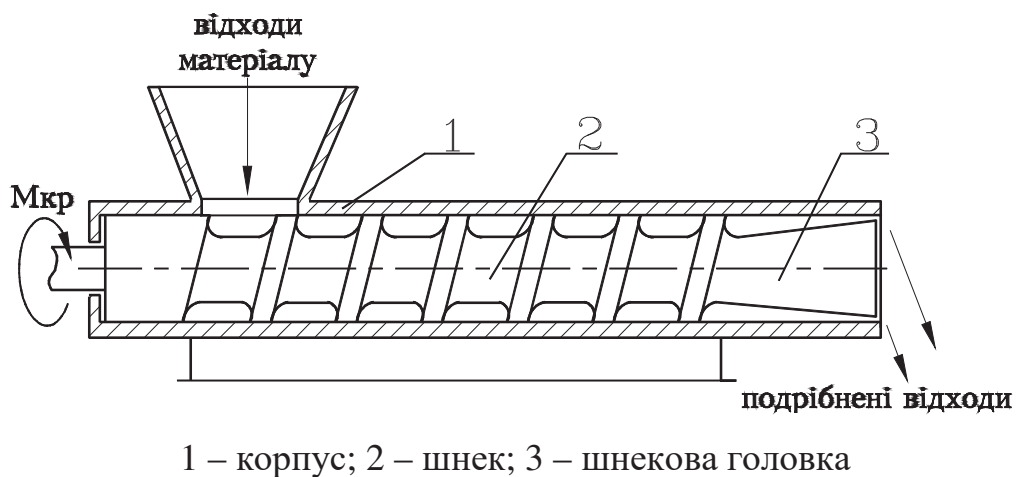


Рисунок 1.5 – Черв'ячний пристрій для утилізації відходів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

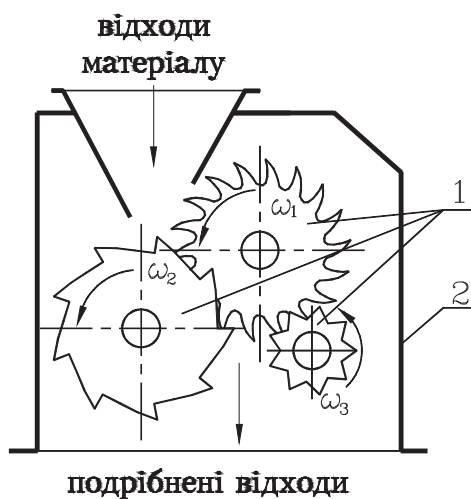
МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
14

Також ці пристрої використовують для переробки текстильних матеріалів за умови, що роторна головка виготовляється з дисків, у яких по зовнішньому діаметру розташовані зуби, і поверхня зони переробки також виконана зубчатою [23].

З метою збереження максимальної довжини волокон ефективними зарекомендували себе подрібнювальні установки, принцип дії яких ґрунтується на розриванні волокнистих відходів. У таких машинах для інтенсифікації процесу переробки застосовують два або більше роторів, причому збільшення їх кількості позитивно впливає на якість отриманого продукту (рис. 1.6). Ротори обертаються в одному напрямку, але з різними кутовими швидкостями, та оснащуються дисками із зубцями, що відрізняються за формою і розмірами [10, 30].

За рахунок цієї конструктивної особливості текстильний матеріал, який надходить у робочу зону, одночасно захоплюється різними роторами. При цьому окремі частини одного й того ж шматка переміщуються у протилежних напрямках, що спричиняє виникнення розтягувальних напружень у матеріалі та призводить до його руйнування.



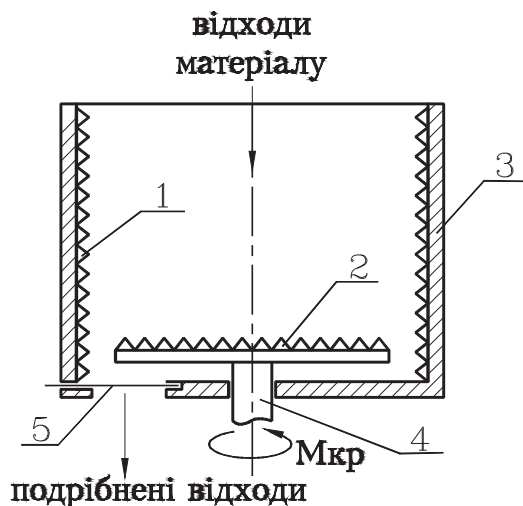
1 – диски; 2 – корпус

Рисунок 1.6 – Пристрій для роздирання волокнистих матеріалів

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Попри наявні переваги, подібні пристрої мають низку обмежень. Зокрема, вони придатні лише для перероблення чисто текстильних відходів без сторонніх включень. Крім того, частина матеріалу з незначними геометричними розмірами може не піддаватися руйнуванню та проходити між дисками роторів без обробки. Наявність таких недоліків істотно звужує сферу застосування даного обладнання й ускладнює розширення напрямів його використання.

Подібні за функціональними можливостями характеристики мають і відцентрові подрібнювачі [11,16,17]. На відміну від попереднього типу машин, руйнування матеріалу в них відбувається переважно під дією відцентрових сил і механізму вільного удару (рис. 1.7). У цьому випадку кінетична енергія частинок, що рухаються, повністю або частково перетворюється на енергію деформації та подальшого руйнування матеріалу.



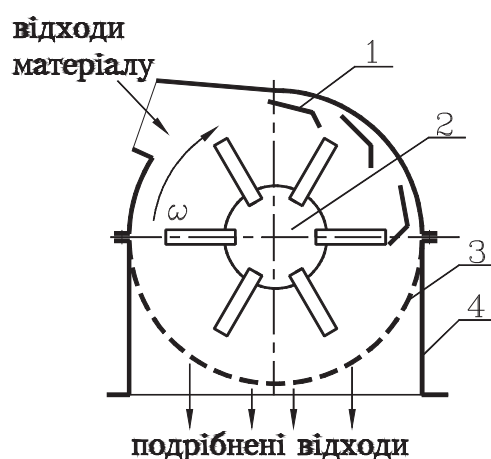
- 1 – рифлі, розташовані на корпусі; 2 – рифлі, розташовані на роторі;
3 – корпус; 4 – вал; 5 – заслінка

Рисунок 1.7 – Відцентровий подрібнювач для утилізації відходів

У пристроях ударної дії подрібнення забезпечується внаслідок механічного впливу удару, який може реалізовуватися у формі стисненого або вільного удару. При стисненому ударі матеріал руйнується між двома взаємодіючими поверхнями, а ефективність процесу визначається масою ударного елемента та його

го швидкістю в момент контакту. У разі вільного удару частинки матеріалу зазнають руйнування під час руху в повітряному середовищі внаслідок зіткнення з ударними тілами або між собою, при цьому визначальними є інерційні сили самих частинок.

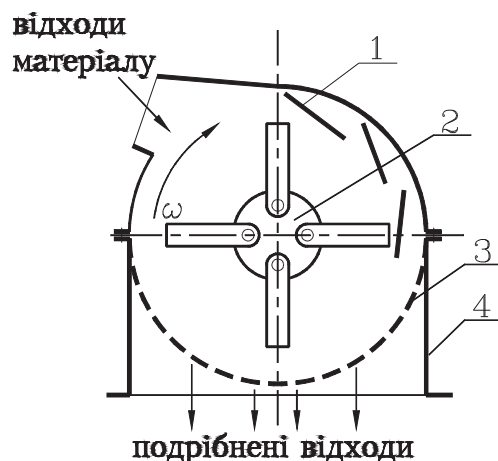
Залежно від конструкції робочого органу подрібнювачі ударного типу поділяють на роторні та молоткові [9, 92]. Роторні установки характеризуються наявністю масивного ротора, на якому жорстко закріплюються змінні бита (рис. 1.8).



1 – рифлі; 2 – ротор; 3 – сито; 4 – корпус

Рисунок 1.8 – Подрібнювач роторний

Матеріал, який руйнується, сприймає удари від усієї ваги ротора. В молоткових пристроях руйнування матеріалу здійснюється за рахунок кінетичної енергії молотків, шарнірно прикріплених до ротора (рис. 1.9) [25,46,78,82].



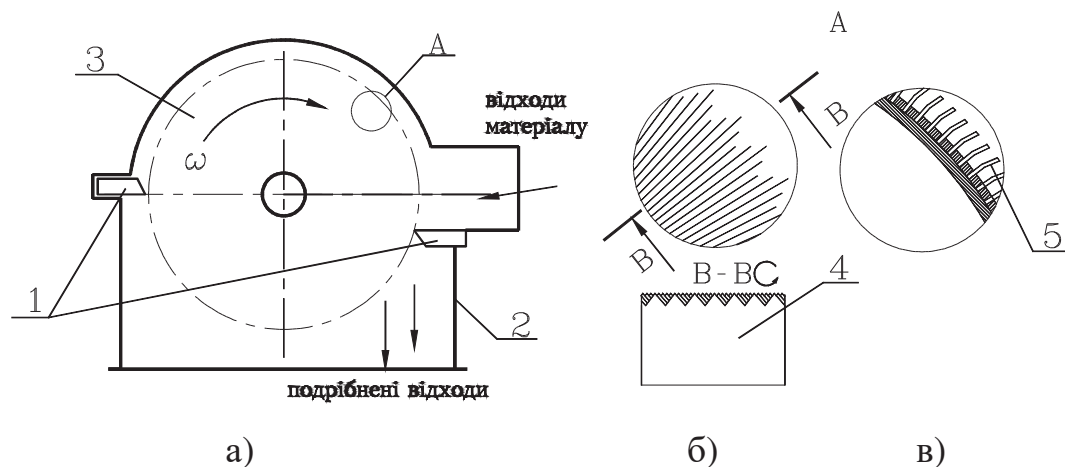
1 – відбивні рифлі; 2 – молотковий ротор; 3 – решітка; 4 – корпус

Рисунок 1.9 – Молотковий пристрій для утилізації відходів

Для перероблення відходів полімерного походження широко застосовують високошвидкісні подрібнювальні установки [20]. Молоткові дробарки включають систему попередньої обробки відходів емульсатором, механізм подачі матеріалу до робочої камери ротора, а також відцентровий вентилятор. З метою підвищення ефективності процесу ротор виконують із змінною щільністю розташування молотків: у напрямку руху матеріалу до зони вивантаження кількість молотків на одиницю довжини зростає, тоді як їх товщина поступово зменшується. Робоча швидкість переміщення молотків перебуває в межах 46...52 м/с. Ротор розміщується в корпусі, обладнаному відбивними рифлями, а на його осі встановлюється відцентровий вентилятор, що забезпечує транспортування матеріалу в зоні подрібнення.

Порівняно з роторними установками молоткові подрібнювачі набули значно ширшого поширення, що пояснюється їх вищою продуктивністю та здатністю забезпечувати більшу довжину отриманого волокна. Водночас істотними недоліками високошвидкісної ударної переробки є інтенсивний нагрів матеріалу та значні енергетичні витрати. Для зменшення негативного впливу цих факторів пропонується здійснювати попередню обробку відходів водою або емульсійними

речовинами. Проте такі підходи не набули широкого промислового застосування через необхідність подальшого сушіння подрібненого продукту.



- а) дезінтегратор; б) пластинчатий ротор; в) голчатий ротор;
 1 – ножі статора; 2 – корпус; 3 – ротор; 4 – пластини дисмембратора;
 5 – голки голкофрези

Рисунок 1.10 – Голкофрезовий пристрій для утилізації відходів

Утилізація відходів легкої промисловості в дезінтеграторах і дисмембраторах здійснюється переважно за рахунок ударної взаємодії [22, 78]. Обладнання цього типу складається з ротора та статора (рис. 1.10 а). Статор виконують у вигляді корпусу з двома контрножами та завантажувально-розвантажувальними отворами, тоді як ротор може мати різне конструктивне виконання (рис. 1.10 б). Зокрема, він може бути сформований із набору пластин [24], розташованих паралельно осі обертання і таких, що відрізняються за розмірами, або виконаний у вигляді циліндра з поверхнею, вкритою голками, чи у формі циліндричної металеві щітки [15].

Процес утилізації в зазначених машинах може реалізовуватися в різних режимах. Шляхом зміни частоти обертання ротора та інтенсивності подачі матеріалу забезпечується регулювання дисперсності готового продукту в широкому

діапазоні. Дезінтегратори та дисмембратори придатні для перероблення матеріалів із різними фізико-механічними властивостями, зокрема полімерів, гуми, текстилю, натуральної та штучної шкіри й хутра, як окремо, так і в комбінованому вигляді. Під час утилізації волокнистих матеріалів отримують розділені волокна, тоді як для матеріалів іншої структури характерним є формування дрібнодисперсного порошку.

Зазначені технологічні можливості голкофрезового обладнання дають змогу здійснювати перероблення матеріалів різної структурної будови зі збереженням основних властивостей їх складових, що є складно досяжним для інших типів утилізаційних установок. Разом із тим подальше широке промислове впровадження цього способу стримується недостатньою кількістю ґрунтовних аналітичних і експериментальних досліджень процесів взаємодії робочих органів обладнання з оброблюваним матеріалом.

1.2 Аналіз математичних моделей процесів механічної утилізації відходів в різноманітних пристроях

Процес зосередженого різання [48], реалізований в роторних пристроях для утилізації відходів, є достатньо відомим і вивченим. Для теоретичного відображення вимог для розрахунків основних параметрів роторних пристроїв використовується методика, яка базується на залежностях пружної деформації матеріалу. На основі цієї методики отримана залежність потужності переробки N_{cp} , кВт, від середнього розміру часток матеріалу і конструктивно-кінематичних факторів [36].

$$N_{cp} = \frac{q_p b h L_z Z_3 n}{1000}, \quad (1.1)$$

де q_p – питомий опір різанню;

b – ширина зони переробки;

h – висота смуги, що руйнується;

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

L_z – подача на один ніж;

Z_3 – загальна кількість ножів ротора;

n – частота обертання ротора.

Це рівняння дозволяє дуже приблизно визначити потужність переробки роторним подрібнювачем.

В наш час найбільш повно досліджено процес утилізації, що реалізується на валковому обладнанні, і його можна характеризувати як пружно – деформаційний метод. Для дослідження і розробки початкових вимог, для розрахунків основних параметрів валкових механізмів були використані теоретичні методи дослідження, основані на гідродинамічній теорії вальцювання, залежностях пластичної або пружної деформації матеріалу, теорії подібності або теорії розмірностей.

Теорія гідродинамічного вальцювання [36,37] розглядає як початкові рівняння руху в'язкої рідини Нав'є-Стокса за умов сталої плоскопаралельної течії. Ця теорія розглядає поведінку високо полімерних матеріалів при деформуванні в міжвалковому зазорі з припущеннями, як в'язка течія не ньютонівської рідини при ізотермічних умовах. При розрахунках обладнання для утилізації волокнистих матеріалів цей метод не може бути використаний.

Методика, яка базується на залежностях пружних деформації матеріалу, може бути використана при переробці пружних чи дуже жорстких пластичних матеріалів, коли головними є не пластичні, а пружні деформації [58]. За цією методикою було отримано рівняння для визначення розпірного зусилля у випадку пружної деформації:

$$P = \frac{4ER^2 b_n}{h_n} \sin \alpha (1 - \cos \alpha), \quad (1.2)$$

де E – модуль пружності матеріалу;

R – радіус валка;

b_n – початкова ширина матеріалу;

h_n – початкова товщина матеріалу;

α – кут захвату матеріалу валками.

Це рівняння дозволяє визначити зусилля між валками при каландруванні плоскої стрічки дуже приблизно. Це пов'язано з тим, що максимальний питомий тиск на матеріал визначається у місці мінімального зазору між валками.

Методика, основана на теорії подібності і аналізу розмірностей, знайшла широке використання для аналізу різноманітних процесів. Використовуючи теорію подібностей, необхідно враховувати, що вона не може дати більше того, що знаходиться в початкових рівняннях, які описують даний процес. Вони лише дозволяють знайти інтегральний розв'язок цих рівнянь, які дійсні для групи подібних явищ в деяких межах.

На основі теорії розмірностей отримана методика для розрахунків розпірних зусиль і потужності валків [86]. При постійній температурі обробки загальна функція для визначення розпірного зусилля буде мати вигляд:

кг/год, і потужності N , кВт

$$P = f(B, \gamma, \omega, h_3, D, L, F), \quad (1.3)$$

де $B = \frac{h_n - h_2}{h_n - h_1}$ – коефіцієнт відновлення матеріалу;

γ – питома вага матеріалу;

ω – кутова швидкість валка;

D – діаметр валка;

L – ширина матеріалу на валках;

F – фрикція валків;

h_n – початкова висота матеріалу;

h_1 – висота матеріалу під навантаженням;

h_2 – висота матеріалу після зникнення навантаження.

На основі експериментальних досліджень процесу утилізації твердих матеріалів на дробильних валкових машинах [42] запропоновані формули для роз-

рахунків продуктивності P , кг/год, і потужності N , кВт, в залежності від ступеня подрібнення і конструктивних факторів

$$P = 3600Ld_1VK_pD, \quad (1.4)$$

$$N = 28,6VL(D+0,25)$$

$$\text{або} \quad (1.5)$$

$$N = 0,1iP,$$

де V – колова швидкість валків, м/с; L – довжина валків, м; d_1 – зазор між валками, м; K_p – коефіцієнт розпушення, кг/м⁴;

D – діаметр валків, м;

i – ступінь подрібнення.

Також були отримані на основі експериментальних досліджень процесу утилізації вулканітів на дробильних і млинових валках [46] формули для розрахунків продуктивності валків Q , кг/год, в залежності від середнього розміру часток матеріалу і конструктивних факторів:

– дробильні валки

$$Q = 150i^{0,5}d_kLV_c\gamma, \quad (1.6)$$

– млинові валки

$$Q = 16 + LV_c\gamma d_k i, \quad (1.7)$$

де i – ступінь подрібнення матеріалу;

d_k – середній розмір часток кінцевого продукту, м;

L – довжина валків, м;

V_c – середня швидкість валків, м/с;

γ – густина матеріалу, кг/м³.

Ці формули дозволяють описувати продуктивність і потужність лише конкретних машин, які використовувались при дослідженнях, з конкретними технологічними і конструктивними параметрами.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

На основі експериментально статистичного методу [78] були отримані емпіричні рівняння, що дозволяють описати вплив зміни, швидкості валків і фрикції на дисперсність порошку та енерговитрати на утилізацію. Вони мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 Q &= 1,01(80,23 - 25,46X_1 + 2,22X_1^2) + \\
 &+ (0,63 + 0,21X_2 - 0,01X_2^2), \\
 F_y &= (-2,95 + 5X_1 - 0,48X_1^2) \times \\
 &\times (1,01X_2 - 0,155X_1 + 0,019X_2^2), \\
 \mathcal{E}_{ваз} &= 1,005(17,16 - 11,09X_1 + 2,78X_1^2) \times \\
 &\times (1,43 - 0,28X_2 + 0,155X_2^2), \\
 \mathcal{E}_{нов} &= 1,088(37 + 6,03X_1 - 0,83X_1^2) \times \\
 &\times (1,57 - 0,42X_2 + 0,026X_2^2),
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

де Q – продуктивність утилізації;

F_y – питома поверхня одержаного порошку;

$\mathcal{E}_{ваз}$ – енерговитрати на одиницю ваги матеріалу, що утилізується;

$\mathcal{E}_{нов}$ – енерговитрати на утворену поверхню;

X_1 – фрикція;

X_2 – швидкість тихохідного вала.

В роботі також описуються рівняння регресії, які об'єднують зміну температури робочих органів пристрою для утилізації і початкового розміру гумового порошку з основними характеристиками процесу переробки.

Використовуючи методи теорії пружності та пластичності, теоретичної та прикладної механіки, був отриманий спосіб і пристрій механічного ослаблення структури волокнистого матеріалу в гребінчастих валках [44]. Розроблено новий підхід до процесу ослаблення структури волокнистого матеріалу методом складного деформування, на основі чого отримано залежності для визначення:

– необхідної відносної деформації розтягу для повного випрямлення пріоритетної більшості волокон в дермі;

– напруги та зусиль, що виникають в пучку волокон при деформуванні волокнистого матеріалу.

Необхідна відносна деформація ε_{pm} , що забезпечує повне випрямлення пучка волокон матеріалу, коли кут кручення γ_t дорівнює 0, визначається з виразу

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{pm}^2 \cos^2 \gamma_t (\cos \alpha_1 + \mu^2 \sin^2 \alpha_1) + 2\varepsilon_{pm} \cos^2 \gamma_t \times \\ & \times (\cos^2 \alpha_1 - \mu^2 \sin^2 \alpha_1) + \cos^2 \gamma_t - \cos^2 \gamma_t = 0, \end{aligned} \quad (1.9)$$

де μ – коефіцієнт Пуасона;

γ_t, α_1 – кут початкового кручення та напрямку кручення.

Зусилля, яке утримує пучок волокон в дермі при коефіцієнті тертя між волокнами f , в залежності від ступеня відносної деформації ε_p визначається

$$\begin{aligned} P = P_{CD} + \left(K_2 P_{CD} + \frac{EI}{2\rho^2} \right) \times \\ \times e^{2f \frac{I_0}{I_1} \arccos \sqrt{\cos^2 \gamma_t [(1+\varepsilon_p)^2 \cos^2 \alpha_1 + (1-\mu\varepsilon_p)^2 \sin^2 \alpha_1]}}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

де f – сила тертя, викликана крученням пучків;

$P_{CD} = \eta \frac{dV}{dX} \pi d L_0$ – сила опору зсуву пучків;

$\frac{dV}{dX} = \frac{V}{K_1 d}$ – градієнт швидкості зсуву;

$K_1 d$ – товщина зазору виражена через діаметр пучка;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості міжволоконної речовини;

$K_2 = \frac{I_1}{I_0} = \frac{1}{n}$ – величина, обернена до числа прямолінійно звитих ділянок,

які складають загальну довжину волокна;

E, I, ρ – відповідно, модуль пружності матеріалу, момент інерції перетину і радіус одного волокна;

d – діаметр пучка волокон.

Напружено-деформований стан пучка волокон визначається величиною утримувального зусилля, описаного співвідношенням (1.10), і кількісно оцінюється за допомогою відповідного аналітичного рівняння:

$$\sigma = \frac{4\eta VI_0}{K_1 d^2} \left(\frac{K_2 4\eta VI_0}{K_1 d^2} + \frac{2EI}{P^2 d^2 \pi} \right) \times e^{2f \frac{I_0}{I_1} \arccos \sqrt{\cos^2 \gamma_i [(1+\epsilon_p)^2 \cos^2 \alpha_1 + (1-\mu\epsilon_p)^2 \sin^2 \alpha_1]}} \quad (1.11)$$

Аналіз математичних моделей утилізації відходів волокнистих і полімерних матеріалів дозволив визначити рекомендований діапазон використання конструкторсько-технологічних факторів, що забезпечує поєднання оптимальних величин одразу трьох функціональних параметрів споживаної корисної потужності, яка припадає на одну канавку в межах від 0,14 кВт до 0,5 кВт, питомої енергії ослаблення волокнистого та полімерного матеріалу в межах від 0,001 кВт·г/кг до 0,023 кВт·г/кг при відносній міцності від 0,35 до 0,74 початкової.

Пружно-деформаційний спосіб також реалізується в черв'ячних подрібнювачах для утилізації гум [47,54,55,65,72].

На основі моделі пластичної течії матеріалу, що руйнується, була отримана приблизна формула для розрахунків тиску екструзії через конічні рельєфи:

$$P_e = \left[\sigma_{ef}(T, V_n) + C \left(U - KT \ln \frac{V_0}{V_n} \right) \right] \ln \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_*} \quad (1.12)$$

де $\sigma_{ef}(T, V_n)$ – ефективне значення межі пластичності при деформуванні матеріалу, що руйнується;

U – енергія активізації процесу тертя;

$\lambda_{\max}, \lambda_*$ – максимальний і критичний ступінь стиснення матеріалу;

V_n – швидкість переміщення плунжера;

C, V_0 – константи.

У результаті комплексного застосування аналітичних, числових і експериментальних досліджень було сформовано більш універсальний та детальний під-

хід до визначення раціональних геометричних і технологічних характеристик черв'ячного механізму, призначеного для переробки гумових відходів [55]. Теоретичний аналіз процесу деструкції гуми базувався на використанні термодинамічної концепції опису міцнісних властивостей полімерів, що дало змогу розробити аналітичну модель перебігу процесу переробки матеріалу в каналі роторної головки.

$$\left\{ \begin{array}{l} d\varepsilon_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_p}{R-r} dX; d\varepsilon_u = \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{V_\rho}{V_x} \right) d\varepsilon_0; \\ d\gamma_x = \left(1 - \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{V_\rho}{V_x} \right) \right) (1,7 - 0,7\varepsilon_0) d\varepsilon_0; \\ d\sigma_u = \frac{E^* d\varepsilon_u}{(1-\varepsilon_i)^2}; d\tau_x = \frac{E^* d\gamma_x}{(1-\gamma_i)^2}; \\ d\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_u^2 + \frac{3}{2}(d\gamma_x^2 + d\gamma_z^2)}; \\ dA_p^{\text{def}} = \sigma_i d\varepsilon_i; dS^{\text{def}} = \frac{1}{U} dA_p^{\text{def}}; \\ V_\rho = 2\pi n(r + X \operatorname{tg} \varphi_p); \\ V_x = \frac{Q}{\pi \left(R^2 - (r + X \operatorname{tg} \varphi_p)^2 \right)}; \\ \sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sigma_u^2 + 6(\tau_x^2 + \tau_z^2)}, \end{array} \right. \quad (1.13)$$

де σ, τ – напруження при деформуванні, відповідно, нормальні і дотичні Па; ε, γ – відносні деформації стиску і зсуву; E^* – постійна (модуль пружності) матеріалу; μ – коефіцієнт Пуасона; dA_p^{def} – приріст питомої роботи деформації гуми; dS – приріст площі вільної поверхні в одиниці об'єму матеріалу; U – питома енергія утворення одиниці площі поверхні руйнування, Дж; $d\varepsilon_0$ – приріст деформації стиску гуми в каналі роторної головки; $d\varepsilon_u, d\gamma_x, d\gamma_z, d\sigma_u, d\tau_x$ – приріст деформації і напружень матеріалу при його переміщені в каналі; ε_i, σ_i – інтенсивність деформацій і напружень при деформації матеріалу; V_x, V_ρ – швидко-

сті руху матеріалу, відповідно, в напрямку осі каналу та відносного руху по поверхні ротора, м/с; Q – об’ємна продуктивність, м³/с; φ_p – конусність ротору, рад; R, r – радіуси, відповідно, циліндра і хвостовика ротора, м; n – частота обертання ротора, об/с.

Отримана математична модель дає змогу встановити функціональний зв’язок між ступенем подрібнення матеріалу та величиною напірного тиску, з одного боку, і відносним обтисканням гуми в каналі роторної головки та режимами роботи обладнання - з іншого. Це дозволяє кількісно оцінювати вплив основних технологічних параметрів на ефективність процесу утилізації.

Разом із тим, процеси, що реалізуються в молоткових установках для переробки відходів, залишаються недостатньо дослідженими. Їх опис, як правило, базується на використанні емпіричних залежностей, запропонованих у роботах [20, 40, 69]. Зокрема, для утилізації пружних матеріалів продуктивність переробки n , кг/год, рекомендується визначати за відповідною узагальненою формулою.

$$30D_p L_p \leq n \leq 40D_p L_p, \quad (1.14)$$

де D_p, L_p – діаметр і довжина ротора, м; N , кВт - потужність, яка визначається з рівняння:

$$N = 1,34D_p^2 L_p \varpi, \quad (1.15)$$

де ϖ – кутова швидкість.

У молоткових пристроях, призначених для переробки волокнистих матеріалів — передусім текстильних та полімерних волокон [20], - з метою інтенсифікації процесу утилізації запропоновано збільшувати щільність розташування молотків на одиницю довжини в напрямку руху матеріалу до виходу з робочої зони. Вибір щільності розміщення молотків здійснюється відповідно до встановленого співвідношення, яке враховує конструктивні особливості пристрою.

$$P = 29,52 + 275(L - 0,072)^2, \quad (1.16)$$

де L – довжина зони переробки відходів (область розташування молотків).

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Крім того, пропонується зменшити товщину молотків в напрямку виходу матеріалу. Товщина молотків визначається таким чином:

$$B = \left(0,5 + \frac{2,8}{L + 0,3} \right) 10^3. \quad (1.17)$$

Разом із тим, зазначена методика орієнтована виключно на підвищення продуктивності процесу і не дозволяє встановити взаємозв'язок між ключовими конструктивно-технологічними параметрами обладнання для утилізації. Це істотно обмежує можливості її використання для оптимізації процесу руйнування матеріалу.

До недавнього часу голкофрезові машини, що застосовуються для утилізації волокнистих відходів, практично не досліджувалися з позицій аналітичного опису процесів руйнування. Зокрема, були відсутні залежності, які б пов'язували характер деструкції матеріалу з конструктивно-кінематичними параметрами обладнання та дозволяли прогнозувати довжину отриманого волокна. Саме це стало однією з причин обмеженого впровадження дезінтеграторів у промислову практику.

Найбільш близькими за фізичною суттю до процесу подрібнення в дезінтеграторах є операції тріпання [40, 41, 74] та чесання [34, 41, 51, 89], що застосовуються на тріпально-чесальному обладнанні в легкій промисловості для попередньої підготовки волокнистої маси.

Так, у роботі [89] запропоновано методику визначення продуктивності тріпальної машини як функції швидкості обертання валків та лінійної густини волокнистого полотна. При цьому вплив тріпала на борідку описується через імпульс сили, що виникає в момент удару. Дія ударної сили на елементарну ділянку борідки за нескінченно малий проміжок часу розглядається як елементарний імпульс, напрямлений уздовж лінії дії сили. Сумарний імпульс удару біла тріпала за кінцевий інтервал часу визначається як інтеграл від суми відповідних елементарних імпульсів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$I = \int_0^{t_1} P dt . \quad (1.18)$$

У роботі [34] для аналізу процесу кардочесання використано методику визначення ступеня насиченості гарнітурного барабана, в основі якої лежить фундаментальний закон динаміки. Застосування цього закону для встановлення залежностей між параметрами процесу, конструктивними характеристиками обладнання та властивостями кінцевого продукту дозволяє отримати результати, максимально наближені до реальних умов функціонування ударних систем.

Процес розпушення волокнистої маси також доцільно розглядати як аналогічний процесу подрібнення волокнистих матеріалів у дезінтеграторах. Зокрема, у роботі [89] наведено методику визначення умови відриву окремого фрагмента волокна від загальної маси, яка може бути представлена у відповідному аналітичному вигляді.

$$P > \frac{(F_1 + F_2) \cos(\theta + \beta)}{\cos \beta}, \quad (1.19)$$

де F_1 – сила тертя матеріалу об стінку барабана, Н; F_2 – сила тертя відіраного шматка об матеріал, Н; β – кут між передньою гранню барабана і перпендикуляром до поверхні відбору, рад; θ – кут між дотичною до кривої траєкторії барабану і поверхнею відриву шматка, рад.

Виходячи з наведеного критерію, можна зробити висновок, що відокремлення елемента волокнистої маси відбувається переважно не внаслідок руйнування окремих волокон, а за рахунок подолання сил тертя між ними. Такий механізм відриву є характерним для розпушеної структури матеріалу, в якій волокна не мають жорстких міжволоконних зв'язків і взаємодіють переважно за рахунок контактного тертя.

У роботі [45] здійснено спробу кількісної оцінки сумарної сили тиску волокнистого матеріалу на ріжучу кромку тріпального била. Загальну силу взаємодії матеріалу з кромкою била запропоновано описувати відповідним аналітичним виразом, що враховує умови контакту та характер руху матеріалу в робочій зоні.

						MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
							30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

$$N = \frac{1}{\mu}(T - T_{in})(e^{\mu\varphi} - 1), \quad (1.20)$$

де T – зусилля натягу волокнистого шару, що виникає внаслідок переміщення біла, Н; $T_{in} = \rho\delta\gamma_r^2$ – інерційна сила волокнистого шару, який перебуває в контакті з білом, Н; μ – коефіцієнт тертя між волокнистим матеріалом і робочою поверхнею біла; ρ – густина матеріалу, м³/кг; γ_r – швидкість елементарної ділянки матеріалу у відносному русі, м/с; φ – кут обхвату кромки біла шаром матеріалу, рад.

У процесі дослідження тріпання встановлено, що сили натягу волокнистого шару є пропорційними його масі та квадрату лінійної швидкості руху планок біла. Аналогічну залежність від квадрату швидкості має й інерційна складова силової взаємодії. Таким чином, усі основні сили, які діють на елементарну ділянку шару, що контактує з кромкою планки біла, масштабуються пропорційно квадрату її швидкості. При цьому показано, що на величину сили натягу істотно впливають геометричні параметри зони контакту, зокрема кут обхвату, а також коефіцієнт тертя між матеріалом і робочими органами.

Проведений аналіз свідчить про високу ефективність переробки та утилізації відходів легкої промисловості з використанням голкофрезових подрібнювачів, з огляду на вимоги до якості кінцевого продукту. Застосування такого обладнання забезпечує можливість одночасної переробки матеріалів, що суттєво відрізняються за фізико-механічними властивостями та структурою, при збереженні їхніх ключових характеристик. Зокрема, у разі обробки неволокнистих матеріалів формується мілкодисперсний порошок, тоді як для волокнистих відходів досягається отримання максимально можливої довжини волокон.

Разом із тим, початкові вимоги та рекомендації, розроблені для існуючих типів обладнання, не можуть бути безпосередньо використані на етапі проектування голкофрезових подрібнювачів. Їх доцільно застосовувати лише на стадії аналітичного аналізу під час формування базових залежностей, що описують закономірності роботи голкофрезового обладнання.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Узагальнення наведених положень створює наукове підґрунтя для розробки нового голкофрезового подрібнювача, призначеного для утилізації волокнистих відходів, а також для проведення комплексу аналітичних і експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію його конструктивно-технологічних параметрів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		32

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВІДХОДІВ

У попередньому розділі виконано аналітичні дослідження процесів утилізації полімерних і волокнистих матеріалів та обґрунтовано конструктивно-технологічні рішення відповідних пристроїв. Для перевірки адекватності розроблених математичних моделей реальним процесам, що відбуваються в зоні руйнування та каналі транспортування матеріалу, необхідне проведення експериментальних досліджень. Такі дослідження дають змогу не лише підтвердити коректність теоретичних положень, а й оцінити вплив факторів, які не були враховані в аналітичних моделях.

2.1 Об'єкти та методика експериментальних досліджень процесу утилізації

Як об'єкти дослідження використовувалися текстильні дубльовані матеріали, що застосовуються у виробництві верху взуття, а також відходи лиття полімерних підшов з термоеластопластів і ПВХ. З метою встановлення функціональних і статистичних залежностей між керованими факторами та вихідними параметрами процесу утилізації було проведено серію експериментальних досліджень.

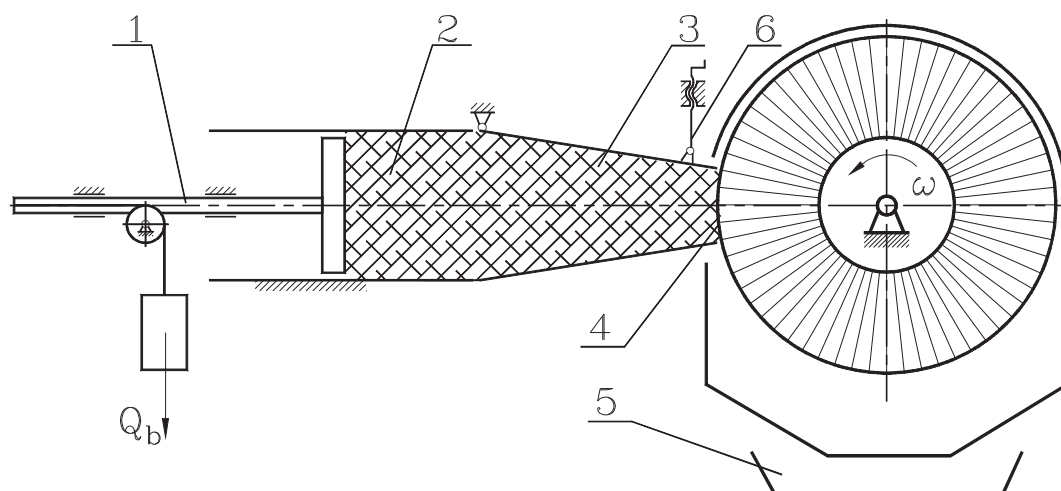
Для цього спроектовано та виготовлено експериментальну установку (додаток А), яка забезпечує реалізацію процесу утилізації з можливістю регулювання основних факторів і реєстрації параметрів процесу.

2.1.1 Опис експериментальної установки

Експериментальні дослідження проводилися на установці, що моделює процеси ущільнення, транспортування та руйнування матеріалу. Установка складається з механізму подачі, каналу транспортування, каналу ущільнення, го-

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

лкофрезового барабана, бункера вивантаження та механізму регулювання кута звуження каналу.



1 – механізм для транспортування; 2 – транспортувальний канал; 3– ущільнювальний канал; 4 – голкофреза; 5 – бункер для вивантаження; 6 – механізм для зміни кута каналу

Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки

Конструкція механізму подачі забезпечує сталий напірний тиск упродовж експерименту, величина якого визначається прикладеним навантаженням. Установка дозволяє змінювати кут звуження каналу ущільнення, а також регулювати частоту обертання голкофрезного барабана в широкому діапазоні за рахунок змінних передаточних відношень клиноремінної передачі.

Для контролю та реєстрації параметрів процесу використовується вимірювально-реєструвальна система (рис. 2.2), яка дозволяє фіксувати потужність приводу під час роботи установки.

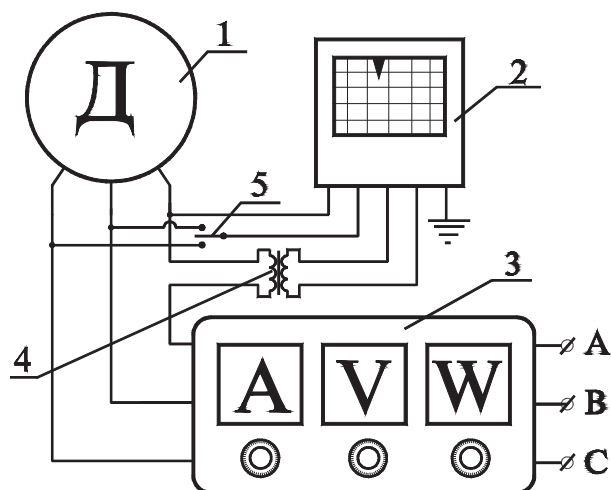
У процесі роботи матеріал під дією напірного тиску надходить у канал ущільнення, де деформується і транспортується в зону руйнування. У зоні взаємодії з голкофрезним барабаном матеріал розділяється на окремі елементи, які в подальшому надходять у бункер вивантаження.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

34



1 – двигун; 2 – самописний прилад Н350; 3 – вимірювальний пристрій К50;
4 – трансформатор струму; 5 – перемикач обмоток

Рисунок 2.2 – Схема системи контролю і реєстрації параметрів

У зоні переробки матеріал зазнає інтенсивного механічного впливу, внаслідок чого розділяється на окремі волокнисті елементи. У процесі подальшої взаємодії з голкофрезним робочим органом ці елементи піддаються руйнуванню та вивантажуються до приймального бункера.

Конструктивне виконання установки сформовано на основі аналізу аналітичних залежностей, що описують закономірності перебігу процесу. Технічні характеристики експериментальної установки наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика експериментальної установки

Частота обертання голкофрезного барабану, об/хв	1500–3200
Діаметр голкофрези, мм	110
Довжина голкофрезного барабану, мм	155
Потужність електродвигуна, кВт	5,5
Частота обертання електродвигуна, об/хв	2990
Максимальна об'ємна продуктивність, кг/год	90
Габаритні розміри, мм	
Ширина	800
Довжина	1250
Висота	1200

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

35

2.1.2 Показники ефективності процесу утилізації

При проведенні експерименту ефективність процесу утилізації оцінювалася за такими показниками:

- вагова продуктивність установки;
- питомі енерговитрати на руйнування матеріалу;
- середня довжина волокон після переробки.

Вагова продуктивність Q визначалася шляхом зважування переробленого матеріалу за певний проміжок часу при сталому режимі роботи. Для кожного режиму обчислювалося середнє значення показника.

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{k t_i}, \quad (2.1)$$

де k – кількість зважувань; m_i – вага i -ї порції матеріалу; t_i – проміжок часу, в який отримана вага m_i .

Енергія, витрачена на руйнування матеріалу, визначалася за різницею між повною потужністю приводу та потужністю холостого ходу. Для підвищення точності результатів використовували усереднення значень для кожного режиму.

Довжина волокон після утилізації визначалася окремо для кожної групи матеріалів як середнє значення, з урахуванням їх структурної неоднорідності.

При проведенні експериментальних досліджень ефективність процесу утилізації визначалася наступними показниками:

- вагова продуктивність експериментальної установки;
- енергетичні витрати на руйнування;
- величина волокна, яке отримане після утилізації.

Вагова продуктивність Q визначалася шляхом зважування волокон, що отримані за деякий проміжок часу при сталому процесі утилізації, і для отри-

мання більш точних даних для кожного режиму визначалось середнє значення вагової продуктивності за формулою:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{t_i}}{k}, \quad (2.1)$$

де k – кількість зважувань; m_i – вага i -ї порції матеріалу; t_i – проміжок часу в який отримана вага m_i .

Витрати енергії на руйнування волокнистих і полімерних матеріалів в експериментальній установці визначалися з використанням вимірювально-реєструвальної системи, що забезпечує фіксацію енергетичних параметрів у процесі роботи обладнання.

На основі результатів експериментальних досліджень енергію, спожиту під час утилізації матеріалу, визначали за значенням потужності приводу. Розрахунок здійснювали як різницю між повною потужністю установки в робочому режимі та потужністю холостого ходу. З метою підвищення достовірності отриманих результатів для кожного режиму роботи обчислювалося середнє значення енерговитрат на утилізацію відходів відповідно до формули:

$$A = t \frac{\sum_{i=1}^k (W_i - W_{xx})}{k}, \quad (2.2)$$

де W_i – загальна потужність; W_{xx} – потужність, що витрачається при холостому ході.

Під час експериментальних досліджень використовувалися текстильні дубльовані матеріали, до складу яких входять волокна з різними фізико-механічними властивостями, а також полімерні матеріали. Оскільки довжина волокон після переробки істотно залежить від їх природи та структури, цей показник визначався окремо для кожної групи матеріалів у вигляді середньої довжини волокон відповідно до залежності:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{k}, \quad (2.3)$$

де L_i – довжина i -го волокна.

2.1.3 Визначення факторів, що впливають на процес утилізації

З метою вибору параметрів оптимізації та обґрунтування схеми планування експерименту було виконано аналіз апріорних наукових даних і результатів попередніх досліджень. Проведений аналіз дозволив ідентифікувати основні фактори, які визначають кількісні та якісні характеристики процесу утилізації волокнистих відходів.

Встановлено, що при переробці волокнистих матеріалів у голкофрезових подрібнювачах вирішальний вплив на довжину волокон після утилізації та величину питомих енерговитрат мають такі фактори:

- швидкість деформування матеріалу;
- температурні умови процесу;
- фізико-механічні властивості перероблюваного матеріалу;
- швидкість подачі матеріалу в зону руйнування.

Слід зазначити, що частина наведених факторів є похідними від конструктивних і технологічних параметрів утилізаційного обладнання, що дозволяє проводити експериментальні дослідження шляхом варіювання саме цих параметрів. У зв'язку з цим змінні параметри експериментальної установки було згруповано відповідно до їх функціонального зв'язку з визначальними факторами процесу.

Так, швидкість деформування матеріалу визначається окружною швидкістю робочої поверхні голкофрези V_{ok} , тоді як швидкість подачі матеріалу пов'язана з ваговою продуктивністю установки. Температурний режим розглядався як незалежний фактор, оскільки в умовах проведення експерименту його зміна не мала істотного впливу на перебіг процесу переробки.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.2 Дослідження процесу утилізації волокнистих відходів у голкофрезовому подрібнювачі

Ефективність процесу утилізації текстильних і полімерних матеріалів у голкофрезовому подрібнювачі оцінювалася за двома основними критеріями:

- питомими енерговитратами на утилізацію заданої маси відходів;
- середньою довжиною волокон після переробки.

Метою експериментальних досліджень було визначення факторів, що мають найбільш суттєвий вплив на перебіг процесу утилізації, а також формування параметрів оптимізації, які дозволяють кількісно оцінити ефективність роботи обладнання.

2.2.1 Планування експерименту

Традиційний підхід до організації експериментальних досліджень передбачає фіксацію всіх змінних факторів на сталих рівнях із послідовною зміною лише одного з них. Такий підхід є основою однофакторного експерименту. У межах однофакторного методу шляхом варіювання одного параметра за стабілізованих інших отримують часткові залежності досліджуваної величини від окремого фактору.

Однак при дослідженні багатофакторних систем використання однофакторних експериментів призводить до необхідності виконання значної кількості дослідів. Отримані при цьому результати мають переважно ілюстративний характер і не дозволяють сформулювати єдину узагальнену математичну модель процесу. Крім того, тривалість проведення експериментів ускладнює контроль впливу сторонніх факторів, що знижує відтворюваність і достовірність результатів. У зв'язку з цим результати однофакторних експериментів є малоприматними для аналізу складних багатофакторних процесів [31, 53, 83].

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

З огляду на зазначене, у роботі застосовано методи математичного планування та аналізу експерименту, які дозволяють суттєво скоротити кількість дослідів, підвищити точність результатів і встановити кількісні взаємозв'язки між факторами та параметрами оптимізації.

У процесі експериментальних досліджень як керовані фактори було обрано:

- окружну швидкість робочої поверхні голкофрезового барабана;
- вагову подачу матеріалу.

Параметрами оптимізації прийнято питомі енерговитрати на утилізацію відходів та середню довжину волокон після переробки. Обрані параметри повністю відповідають вимогам, що висуваються до критеріїв оптимізації при плануванні експерименту [32, 68, 83].

Результати аналітичних досліджень процесу руйнування показали, що для адекватного опису досліджуваних залежностей доцільно використовувати апроксимаційну модель у вигляді алгебраїчного полінома другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (2.4)$$

де b_i, b_{il}, b_{ii} – коефіцієнти регресії; x_i, x_l – змінні фактори.

У зв'язку з цим було прийнято рішення здійснювати експериментальні дослідження з використанням некомпозиційного рототабельного плану другого порядку. Такий підхід забезпечує отримання адекватної математичної моделі за мінімальної кількості експериментальних дослідів.

При дослідженні процесу, що характеризується наявністю двох керованих факторів, доцільним є застосування плану у вигляді правильного шестикутника (рис. 2.3), який забезпечує рівномірне розміщення експериментальних точок у факторному просторі.

На рисунку 2.3 наведено номери окремих дослідів, а в дужках — відповідні рівні факторів, за яких вони проводилися. Зазначений план є рототабельним і за кількістю експериментів є більш економічним порівняно з класичним рототабельним

планом другого порядку, що суттєво зменшує трудомісткість і тривалість досліджень.

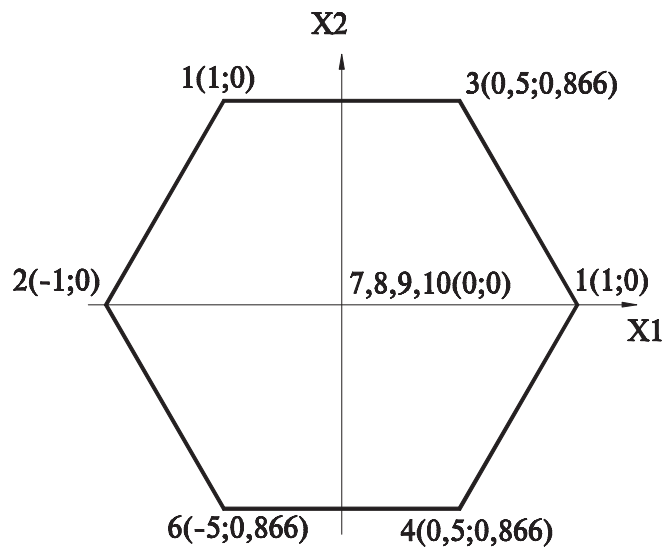


Рисунок 2.3 – Некомпозиційний рототабельний план другого порядку

2.2.2 Значення факторів і рівні їх зміни

З метою запису умов експериментальних досліджень та обробки отриманих даних рівні факторів кодуються. Згідно з [85] некомпозиційний рототабельний план для фактору X1 може використовувати п'ять рівнів (+1; 0,5; 0; -0,5; -1), а для фактору X2 – три рівня (+0,866; 0; -0,866).

Вибрані такі фактори:

X1 – колова швидкість поверхні робочого органу (голкофрези);

X2 – подача матеріалу (вагова).

При кодуванні факторів X1 і X2 верхній рівень позначатимемо +1, нижній – -1, а основний – 0.

Кодування фактору x_i визначатимемо з такого виразу [85]

$$x_i = \frac{X_i^n - X_{i0}^n}{\varepsilon_i}, \quad (2.5)$$

наведені в таблиці 2.4. Похибка вимірювального приладу перебувала в межах $\pm 0,005$ мм. Отримані експериментальні дані було перевірено на однорідність дисперсій похибок із використанням критерію Кохрена. Коефіцієнти рівняння регресії (2.4) визначалися методом найменших квадратів [85], після чого проводилась оцінка їх статистичної значущості за довірчими інтервалами з використанням критерію Стюдента при рівні значущості 5 % [93].

У результаті перевірки встановлено, що окремі коефіцієнти рівняння регресії за абсолютною величиною не перевищують відповідних довірчих інтервалів [83]. З огляду на це зазначені коефіцієнти визнано статистично незначущими та виключено з рівняння регресії (2.4).

Після проведення регресійного аналізу й перевірки адекватності моделі за критерієм Фішера [83] було отримано уточнені рівняння регресії. Для переходу до натуральних залежностей у ці рівняння підставляли значення кодованого фактору X відповідно до виразу (2.5), у результаті чого отримано функціональні залежності довжини волокон від окружної швидкості робочої поверхні голкофрези для досліджуваних матеріалів:

– для вовняних волокон

$$L_{вол} = 12,54 - 6,29 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 1,63 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2, \quad (2.6)$$

– для віскозних волокон

$$L_{вол} = 6,07 - 3,26 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 1,51 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2, \quad (2.7)$$

– для лавсанових волокон

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$L_{вол} = 22,22 - 10,05 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 3,10 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2, \quad (2.8)$$

– для вовняних волокон (друге вимірювання)

$$L_{вол} = 13,17 - 6,38 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 2,71 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2, \quad (2.9)$$

– для віскозних волокон (друге вимірювання)

$$L_{вол} = 6,74 - 3,43 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 0,95 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2, \quad (2.10)$$

– для лавсанових волокон (друге вимірювання)

$$L_{вол} = 23,37 - 10,56 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + 2,97 \left(\frac{2(\ln V_{ок} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2. \quad (2.11)$$

Аналогічним чином, із застосуванням композиційного рототабельного плану другого порядку, були проведені експериментальні дослідження питомих енерговитрат на утилізацію полімерних і волокнистих матеріалів.

Дослідження здійснювалися на рівнях факторів та з інтервалами їх варіювання, наведеними в таблиці 2.2, відповідно до матриці плану експерименту (табл. 2.3). За результатами реалізації робочої матриці були отримані значення енергії руйнування матеріалу, віднесеної до його маси, які подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.5 – Значення параметрів оптимізації

Номер досліджу	Енергія руйнування матеріалу N1, Дж/г	Енергія руйнування матеріалу N2, Дж/г
1	115,03	142,10
2	110,50	137,36
3	112,27	138,92
4	112,84	139,54
5	110,75	137,75
6	111,21	138,36
7	112,87	138,98
8	111,39	13852
9	111,39	139,34
10	111,52	139,53

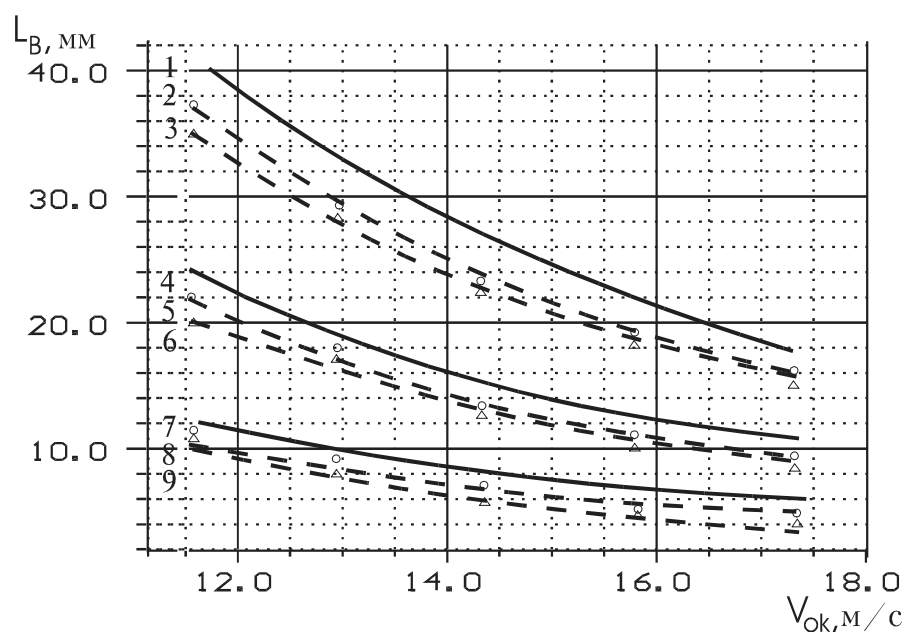
Обробка експериментальних даних дала змогу визначити параметри оптимізації - питомі енерговитрати на руйнування матеріалу, які залежать від основних керованих факторів, а саме: окружної швидкості обертання голкофрези та вагової подачі матеріалу. Зазначені залежності були отримані окремо для двох типів дубльованих матеріалів.

$$\begin{aligned}
 A_1 = & 111,74 + 2,01 \left(\frac{2(\ln V_{ok} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + \\
 & + 1,01 \left(\frac{2(\ln V_{ok} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2 - \\
 & - 0,26 \left(\frac{2(\ln Q_{ok} - \ln 19,11)}{\ln 19,11 - \ln 2,485} + 1 \right)^2.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
 A_2 = & 139,09 + 1,97 \left(\frac{2(\ln V_{ok} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right) + \\
 & + 0,63 \left(\frac{2(\ln V_{ok} - \ln 17,27)}{\ln 17,27 - \ln 11,51} + 1 \right)^2 - \\
 & - 0,81 \left(\frac{2(\ln Q_{ok} - \ln 19,11)}{\ln 19,11 - \ln 2,485} + 1 \right)^2.
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Таким чином, рівняння (2.6)-(2.11) дозволяють визначати довжину волокон після переробки у голкофрезовому подрібнювачі в межах варіювання досліджуваних факторів, тоді як рівняння (2.12), (2.13) дають змогу обчислювати енергію руйнування, віднесену до одиниці маси матеріалу. Це, у свою чергу, дозволяє кількісно оцінити роботу руйнування як функцію швидкості деформування та швидкості подачі матеріалу в зону переробки.

На рисунку 2.4 наведено графічні залежності середньої довжини волокон від окружної швидкості голкофрезового робочого органу для трьох основних текстильних і полімерних матеріалів, використаних у ході експериментальних досліджень.



1 – полімерний матеріал ТЄП; 2, 3 – лавсан; 4, 7 – полімерний матеріал ПВХ, відповідно, марка ОПЛП-2 та ОПЛП-1; 5, 6 – вовна; 8, 9 – віскоза

Рисунок 2.4 – Графік залежності довжини волокон від окружної швидкості поверхні голкофрези

Аналіз наведених графіків свідчить про ідентичний характер кривих як для волокнистих, так і для полімерних матеріалів. Це підтверджує можливість засто-

сування математичної моделі ослаблення структури попередньо деформованого матеріалу, розробленої в другому розділі, для опису процесів утилізації відходів різної природи.

Отже, розроблену математичну модель ослаблення структури деформованого матеріалу та методику визначення конструктивних і технологічних параметрів процесу утилізації, побудовану на її основі, доцільно використовувати при проектуванні обладнання для переробки полімерних і волокнистих відходів.

На рисунках 2.5 і 2.6 подано графічні залежності питомої енергії руйнування від швидкості деформування та швидкості подачі матеріалу в зону переробки.

З аналізу графіків видно, що зростання швидкості деформування призводить до збільшення енергії руйнування, що зумовлено зміною фізико-механічних властивостей матеріалу та зростанням площі вільної поверхні. Зі збільшенням подачі матеріалу спостерігається незначне зростання довжини волокон і зменшення питомих енерговитрат, що пояснюється зменшенням питомої площі новоутвореної вільної поверхні при руйнуванні.

Отримані регресійні залежності (2.12), (2.13) підтверджують припущення про можливість нехтування величиною скиду пружної енергії, оскільки питоме збільшення площі вільної поверхні при розриві є незначним, а накопичена енергія пружної деформації переходить у кінетичну енергію зруйнованих частин. Відносне відхилення при цьому не перевищує 20 % ($A_1^p = 109,10$; $A_2^p = 136,60$).

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

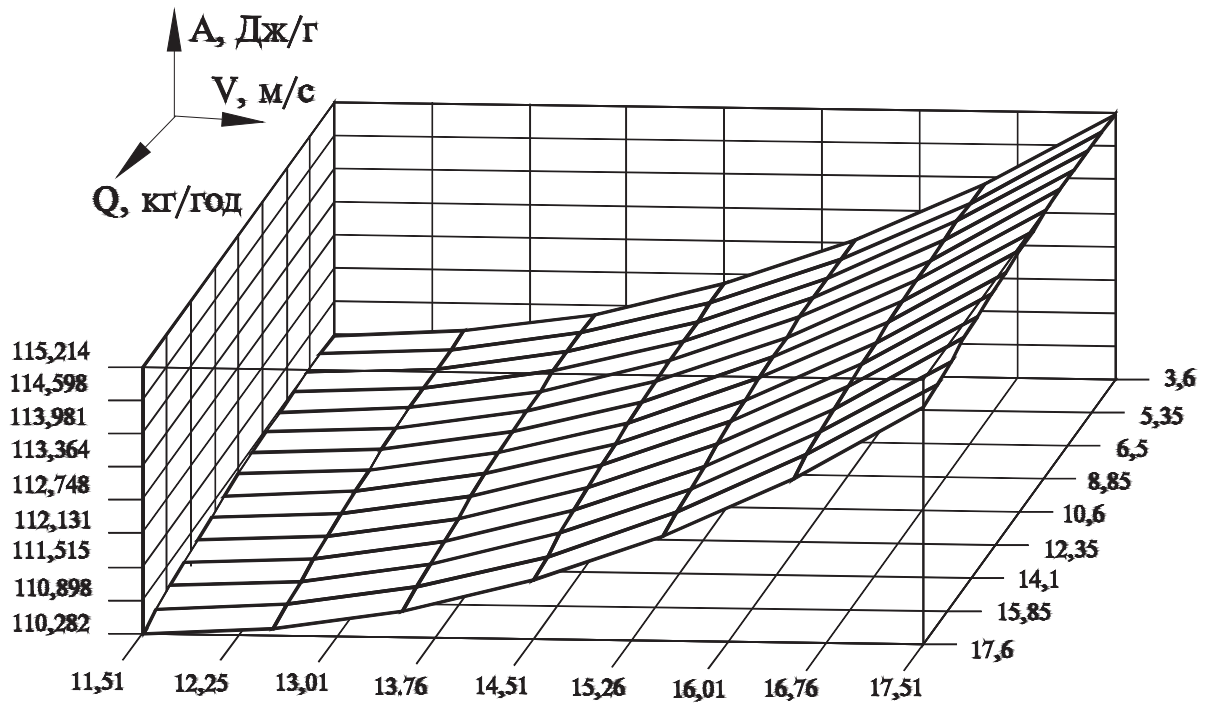


Рисунок 2.5 – Графічна залежність енергії руйнування для матеріалу N1

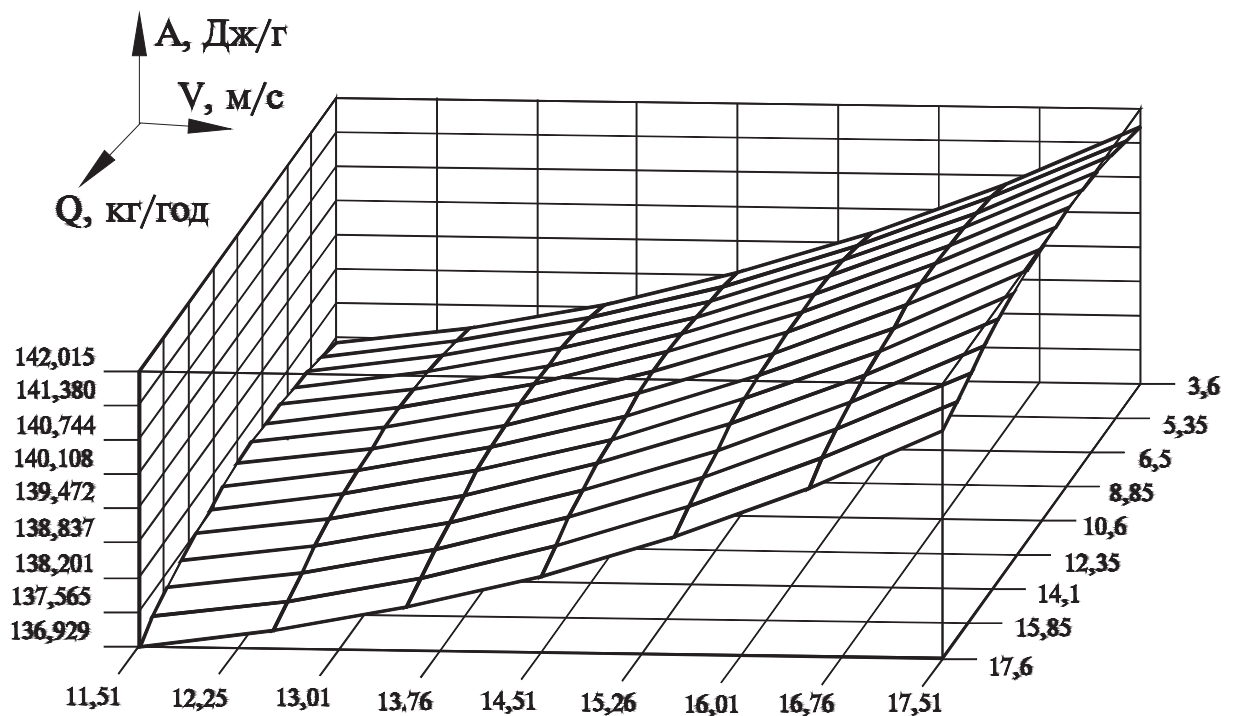


Рисунок 2.6 – Графічна залежність енергії руйнування для матеріалу N2

Запропонована аналітична модель процесу переробки матеріалів забезпечує достатню для інженерної практики точність відтворення процесу утилізації полімерних і текстильних відходів у голкофрезовому подрібнювачі. Її використання дає змогу здійснювати інженерні розрахунки конструктивних та технологічних параметрів обладнання за заданої продуктивності, необхідних геометричних характеристик волокон і відомих фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу.

2.3 Об'єкти та методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження процесів ущільнення та транспортування волокнистих матеріалів у каналі голкофрезового подрібнювача виконувалися з використанням відходів дубльованих матеріалів, що утворюються під час розкרוю листових заготовок. З метою встановлення функціональних і статистичних залежностей між вхідними факторами процесу та його вихідними параметрами було проведено серію лабораторних експериментів. Для цього розроблено та виготовлено спеціальну експериментальну установку, яка забезпечує варіацію досліджуваних факторів і реєстрацію основних параметрів процесу транспортування.

2.3.1 Опис експериментальної установки

Дослідження виконувалися на експериментальній установці (рис. 2.7), конструкція якої дозволяє відтворювати умови транспортування матеріалу в каналі подрібнювача (додаток А). Установка складається з механізму подачі матеріалу 1, каналу живлення 2, транспортного каналу 3, пристрою регулювання кута звуження 4 та вимірювального вузла 5 для реєстрації тиску на виході. Конструкція каналу живлення передбачає мінімальний робочий об'єм, що дозволяє зменшити похибку експерименту та забезпечити стабільність напірного тиску на вході в транспортний канал.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

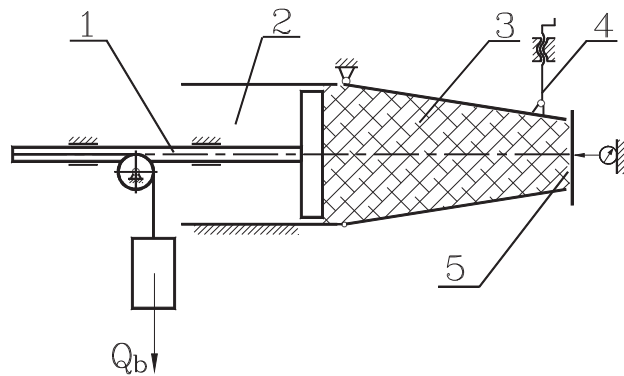


Рисунок 2.7 – Схема експериментальної установки

Принцип роботи установки полягає в попередньому ущільненні матеріалу в каналі живлення з подальшою подачею контрольованого напірного тиску. Після цього фіксується значення тиску на виході каналу. Технічні характеристики установки наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Технічна характеристика експериментальної установки

Напірна сила, що утворюється механізмом транспортування, кг	1–46
Діапазон руху механізму транспортування, мм	250
Висота каналу, мм	0–40
Ширина каналу, мм	0–155
Довжина каналу, мм	0–65
Кут звуження каналу, град.	0–40

Конструктивні можливості установки дозволяють змінювати широкий спектр геометричних і технологічних параметрів та досліджувати їх вплив на процес транспортування.

2.3.2 Визначення показників, що характеризують процес транспортування в каналі подрібнювача

Під час проведення експериментальних досліджень процес транспортування описувався за допомогою двох основних параметрів:

- величини зміни напірного тиску на виході з каналу;
- ступеня деформації матеріалу після проходження транспортного каналу.

Зміна напірного тиску визначалася як різниця між початковим і кінцевим значеннями тиску.

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_e = \frac{m_0}{n_0 e} - \frac{m_e}{n_e e}, \quad (2.14)$$

де m_0, m_e – сили, що діють на матеріал, відповідно, на початку каналу і на кінці каналу, Н; n_0, n_e – висоти каналу, відповідно, на початку та у кінці; e – ширина каналу.

Зміна висоти каналу визначалась за таким рівнянням:

$$H = \frac{n_0 - n_e}{n_0}. \quad (2.15)$$

2.4 Визначення факторів процесу транспортування

Для вибору параметра оптимізації та схеми планування експерименту було виконано аналіз апріорних наукових джерел [35, 50, 57]. У результаті встановлено, що величина зміни напірного тиску під час транспортування волокнистих матеріалів у каналі голкофрезного подрібнювача визначається такими факторами: відносною деформацією матеріалу, довжиною каналу, швидкістю руху матеріалу, температурним режимом і фізичними властивостями сировини.

При цьому швидкість транспортування, температура та фізико-механічні характеристики матеріалу в умовах проведення експерименту можна вважати незалежними факторами, оскільки їх значення залишаються сталими протягом процесу переміщення матеріалу в каналі.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.5 Дослідження процесу транспортування

Зміну напірного тиску в транспортному каналі доцільно оцінювати з урахуванням трьох основних геометричних параметрів: відносної зміни висоти каналу (як показника деформації матеріалу), довжини каналу та його ширини.

Основною метою досліджень є виявлення найбільш значущих факторів, що визначають характер процесу транспортування, та побудова параметра оптимізації як функції цих факторів.

2.5.1 Планування експерименту

Застосування однофакторних методів дослідження для аналізу багатфакторних процесів є малоефективним, тому для проведення експериментів було обрано некомпозиційний план другого порядку. Як параметр оптимізації прийнято величину зміни напірного тиску, яка повністю відповідає вимогам до параметрів оптимізації з точки зору стабільності та інформативності [83, 85].

2.5.2 Фактори та рівні їх варіювання

Для формалізації умов експерименту використовувалося кодування факторів. Як змінні фактори прийнято: X1 - відносна зміна висоти каналу на виході; X2 - довжина каналу; X3 - ширина каналу.

Значення факторів кодувалися на трьох рівнях (+1, 0, -1) відповідно до виразу (2.5). Перелік факторів і відповідні кодовані значення наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Рівні та інтервали зміни факторів

Найменування	X1, %	X2, мм	X3, мм
Інтервал зміни	10	11	22,5
Рівні факторів:			
-1	10	40	110
0	20	51	132,5
1	30	62	155

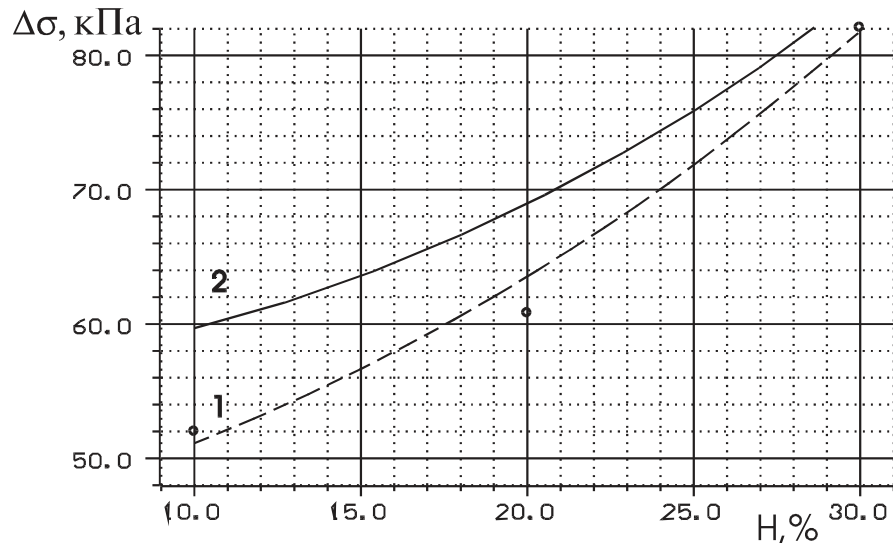
$$\begin{aligned} \Delta\sigma = & 50,10 + 15,15 \left(\frac{2(\ln \varepsilon - \ln 30)}{\ln 30 - \ln 10} + 1 \right) + \\ & + 10,06 \left(\frac{2(\ln L - \ln 62)}{\ln 62 - \ln 40} + 1 \right) + \\ & + 3,18 \left(\frac{2(\ln \varepsilon - \ln 30)}{\ln 30 - \ln 10} + 1 \right)^2 + 3,113 \left(\frac{2(\ln L - \ln 62)}{\ln 62 - \ln 40} + 1 \right)^2. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Отримане рівняння регресії після переходу від кодованих змінних до натуральних параметрів дозволяє визначати зміну напірного тиску залежно від конструктивних характеристик каналу при транспортуванні матеріалу в зону переробки. У межах варіювання факторів дана залежність може використовуватися для розрахунку мінімально необхідного напірного тиску, що забезпечує стабільну подачу матеріалу.

На рисунку 2.8 наведено поверхню відгуку, що ілюструє залежність зміни напірного тиску на виході з транспортного каналу від відносної зміни його висоти на виході та довжини каналу L за сталої ширини $B = 155$ мм. Аналіз поданої залежності свідчить про те, що зі зростанням ступеня деформації матеріалу, а також зі збільшенням довжини каналу спостерігається інтенсивне підвищення втрат напірного тиску $\Delta\sigma$.

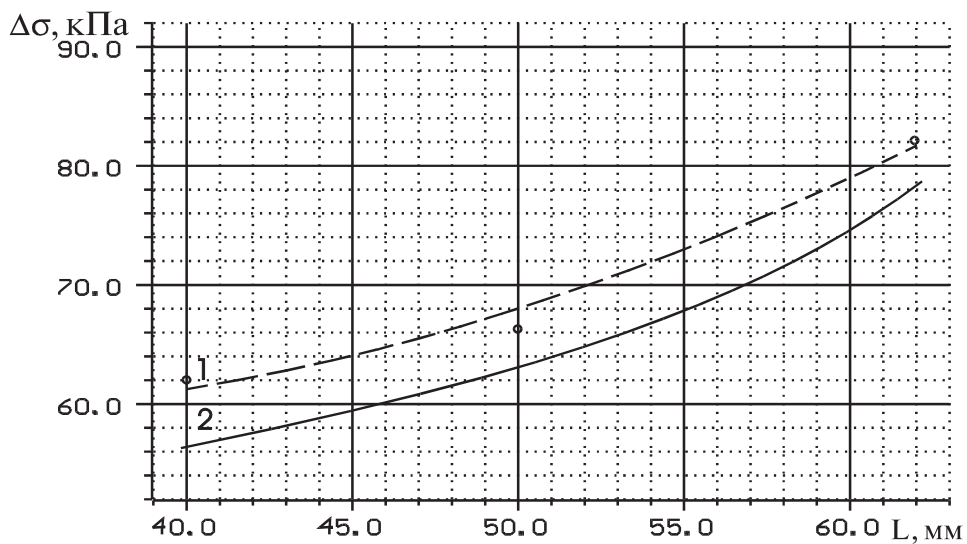
Виявлена закономірність пояснюється зростанням сил тертя між переміщуваним матеріалом і бічними поверхнями каналу, що є наслідком збільшення площі контакту та рівня ущільнення матеріалу під час транспортування.

На рисунках 2.9 і 2.10 наведено експериментальні графіки, які відображають залежність зміни напірної сили $\Delta\sigma$ від відносної зміни висоти каналу на виході та його довжини L , що підтверджує встановлений характер впливу геометричних параметрів каналу на процес транспортування.



1 – при переробці полімерного матеріалу;
 2 – при переробці волокнистого матеріалу

Рисунок 2.9 – Графіки залежності зміни напірного тиску від відносної зміни висоти каналу на виході



1 – при переробці волокнистого матеріалу;
 2 – при переробці полімерного матеріалу

Рисунок 2.10 – Графіки залежності зміни напірного тиску від довжини каналу

Аналіз графічних залежностей показує, що збільшення відносної деформації матеріалу та довжини каналу призводить до зростання напірного тиску, що пояснюється підвищенням сил тертя між матеріалом і поверхнями каналу. При цьому характер залежностей є подібним як для волокнистих, так і для полімерних матеріалів.

2.6 Застосування обладнання для утилізації полімерних і волокнистих відходів

Голкофрезові подрібнювачі є ефективним технічним засобом для переробки дубльованих та комбінованих відходів легкої промисловості, які в умовах сучасного виробництва або зовсім не утилізуються, або переробляються з низькою ефективністю. Обладнання такого типу також придатне для обробки текстильних матеріалів складної структури, до складу яких входять гумові, полімерні та клейові компоненти.

До основних переваг голкофрезових подрібнювачів належать відносно низьке енергоспоживання, компактність, конструктивна простота та висока експлуатаційна надійність, що забезпечує їх ефективне використання як на великих промислових підприємствах, так і в умовах малих виробництв. Висока продуктивність обладнання робить його перспективним для впровадження у технологічні лінії утилізації відходів.

Конструктивна схема голкофрезового подрібнювача може варіюватися залежно від конкретних виробничих завдань і визначається, передусім, необхідною потужністю приводу, способом подачі матеріалу в робочу зону, організацією його транспортування, а також габаритними обмеженнями. Потужність приводу встановлюється з урахуванням заданої продуктивності, яку необхідно забезпечити для ефективної переробки відходів у конкретних умовах експлуатації.

Вибір способу завантаження матеріалу обумовлюється характером надходження відходів у зону переробки. Найбільш раціональним є використання завантажувального бункера, з якого матеріал захоплюється валковим механізмом і безперервно подається в зону подрібнення. Такий спосіб подачі забезпечує стабільність і рівномірність потоку матеріалу, є конструктивно простим і характеризується зниженими енерговитратами порівняно з альтернативними рішеннями.

Практична перевірка ефективності розробленого обладнання здійснювалася на дослідному зразку голкофрезового подрібнювача (додаток А), за допомогою

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

якого було отримано волокнистий наповнювач із полімерних і текстильних відходів. Отриманий матеріал використовувався при виготовленні бетонних розчинів на Хмельницькзалізобетоні. Бетонні суміші з волокнистим наповнювачем застосовувалися для виробництва виробів, у яких використання металевої арматури є технологічно недоцільним або неможливим, зокрема оздоблювальної плитки, тротуарних плит і елементів огороження (додаток Б).

Окрім цього, апробація результатів досліджень проводилася на взуттєвій фабриці ВАТ «Взутекс», де полімерні композиції з волокнистим наповнювачем використовувалися у процесі виготовлення підшов. Очікуваним результатом подальших робіт є створення промислового зразка обладнання для отримання ватоподібної маси з текстильних відходів.

У процесі випробувань і тривалої експлуатації розроблений голкофрезний подрібнювач продемонстрував достатній рівень надійності та стабільності роботи, що підтверджує доцільність його подальшого впровадження у виробничу практику.

2.7 Використання результатів досліджень у проектуванні голкофрезного обладнання

У попередніх розділах роботи були розроблені математичні моделі процесів утилізації волокнистих і полімерних відходів, а також їх транспортування в каналі живлення. Отримані моделі є інструментом для інженерного обґрунтування конструктивних параметрів і режимів роботи голкофрезних подрібнювачів, що дозволяє забезпечити задану продуктивність і необхідний ступінь подрібнення волокон з урахуванням фізико-механічних властивостей перероблюваних матеріалів.

Проектування складних механічних систем розпочинається з формування технічного завдання, яке визначає вимоги до вихідних параметрів обладнання та допустимі межі впливу зовнішніх факторів. Ключовим етапом на цьому етапі є встановлення необхідної продуктивності одного або кількох подрібнювачів, що

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

визначається обсягами утворення відходів та інтенсивністю їх накопичення у виробничому процесі.

З урахуванням можливих напрямів подальшого використання переробленої сировини формуються вимоги до характеристик кінцевого продукту. Для волокнистих матеріалів визначальним параметром є довжина волокон L_B . Зокрема, у разі застосування текстильних і полімерних волокон як наповнювачів для бетонних сумішей доцільною є довжина волокон у діапазоні від 4 до 40 мм. На наступному етапі встановлюються допустимі межі варіювання конструктивних параметрів подрібнювача та режимів його роботи.

Узагальнення зазначених вимог дозволяє сформулювати сукупність вихідних даних, необхідних для математичного моделювання та динамічного аналізу при проектуванні голкофрезового обладнання. Розрахунок основних параметрів пристрою для утилізації відходів виконується у визначеній послідовності відповідно до структурної блок-схеми, наведеної на рисунку 2.11.

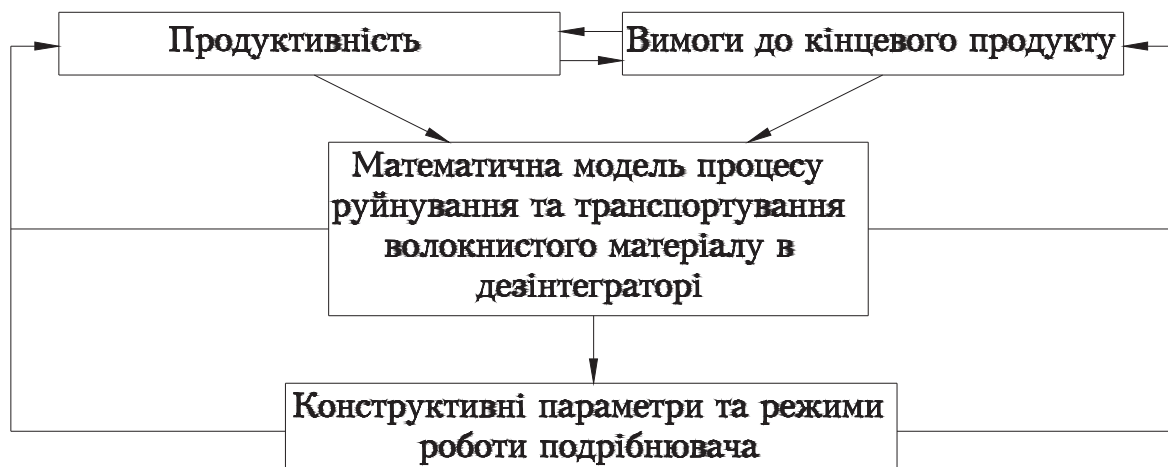


Рисунок 2.11 – Блок-схема методики розрахунку голкофрезового подрібнювача для утилізації відходів

Алгоритм розрахунку параметрів подрібнювача реалізується таким чином: вихідні дані попередньо приводяться до форми, придатної для використання в математичній моделі, після чого вводяться до розрахункової схеми. На основі моделі визначаються конструктивні та технологічні параметри обладнання, які

можуть підлягати обмеженням, зумовленим експлуатаційними або технологічними вимогами. За наявності таких обмежень здійснюється коригування початкових даних із подальшим повторенням розрахункової процедури.

Запропонований підхід до моделювання процесу утилізації волокнистих і полімерних відходів у голкофрезовому подрібнювачі забезпечує можливість обґрунтованого вибору раціональної конструкції обладнання та оптимальних режимів його роботи.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

1. Розроблено та теоретично обґрунтовано комплексну методику експериментальних досліджень технологічного процесу утилізації полімерних і волокнистих відходів, яка забезпечує отримання достовірних кількісних характеристик процесу.

2. Створено та виготовлено експериментальний зразок голкофрезного подрібнювача, що дозволив реалізувати лабораторні дослідження процесу утилізації полімерних і текстильних матеріалів у керованих умовах.

3. На основі експериментальних даних встановлено, що гранулометричні характеристики отриманих волокон визначаються окружною швидкістю робочої поверхні голкофрези. Раціональним є діапазон швидкостей від 6 до 18 м/с, у межах якого формується волокниста маса з середньою довжиною волокон від 4 до 40 мм.

4. Доведено, що питомі енерговитрати процесу утилізації залежать переважно від фізико-механічних властивостей перероблюваного матеріалу, тоді як вплив основних технологічних параметрів, зокрема окружної швидкості голкофрези та інтенсивності подачі матеріалу, має другорядний характер.

5. Кількісно встановлено, що зміна окружної швидкості робочої поверхні голкофрези в межах від 10 до 18 м/с призводить до коливань питомих енерговитрат не більше ніж на 4 %, тоді як збільшення подачі матеріалу з 3,6 до 17,6 кг/год зумовлює зростання енерговитрат лише на 0,8 %.

6. Визначено, що зміна напірного тиску на виході з транспортного каналу істотно залежить від його геометричних параметрів, зокрема довжини, кута звуження та початкової висоти, які формують величину відносної деформації матеріалу, а також від фізичних властивостей сировини.

7. Практичну придатність отриманих результатів підтверджено в умовах виробництва на ТОВ Хмельницькзалізобетон, де за допомогою дослідного зразка було отримано волокнистий наповнювач для бетонних сумішей. Такі суміші ви-

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

користувалися для виготовлення виробів, у яких застосування металевої арматури є технологічно недоцільним, зокрема оздоблювальної плитки, тротуарних плит і огорожувальних елементів.

8. Розроблено математичну модель і методику моделювання процесу подрібнення, що дозволяє визначати роботу, виконувану одним молотком під час руйнування матеріалу, з урахуванням матеріалу молотка, його конструктивних і технологічних параметрів, а також геометричних характеристик робочої зони.

9. Запропоновано методику проектування молоткових технологічних пристроїв для утилізації волокнистих відходів, яка базується на аналізі пружно-деформованого стану, що формується в процесі взаємодії робочого органу з матеріалом, і дозволяє враховувати всі суттєві фактори цього процесу.

10. З використанням розробленої методики визначено оптимальні геометричні параметри робочих органів і раціональні режими переробки відходів текстильного та шкіряного виробництва, що забезпечують зниження енерговитрат за умови збереження високої якості подрібнення. На основі отриманих результатів спроектовано та виготовлено дослідний зразок для переробки вторинних текстильних матеріалів (додаток Г).

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		61

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Арк.
					62

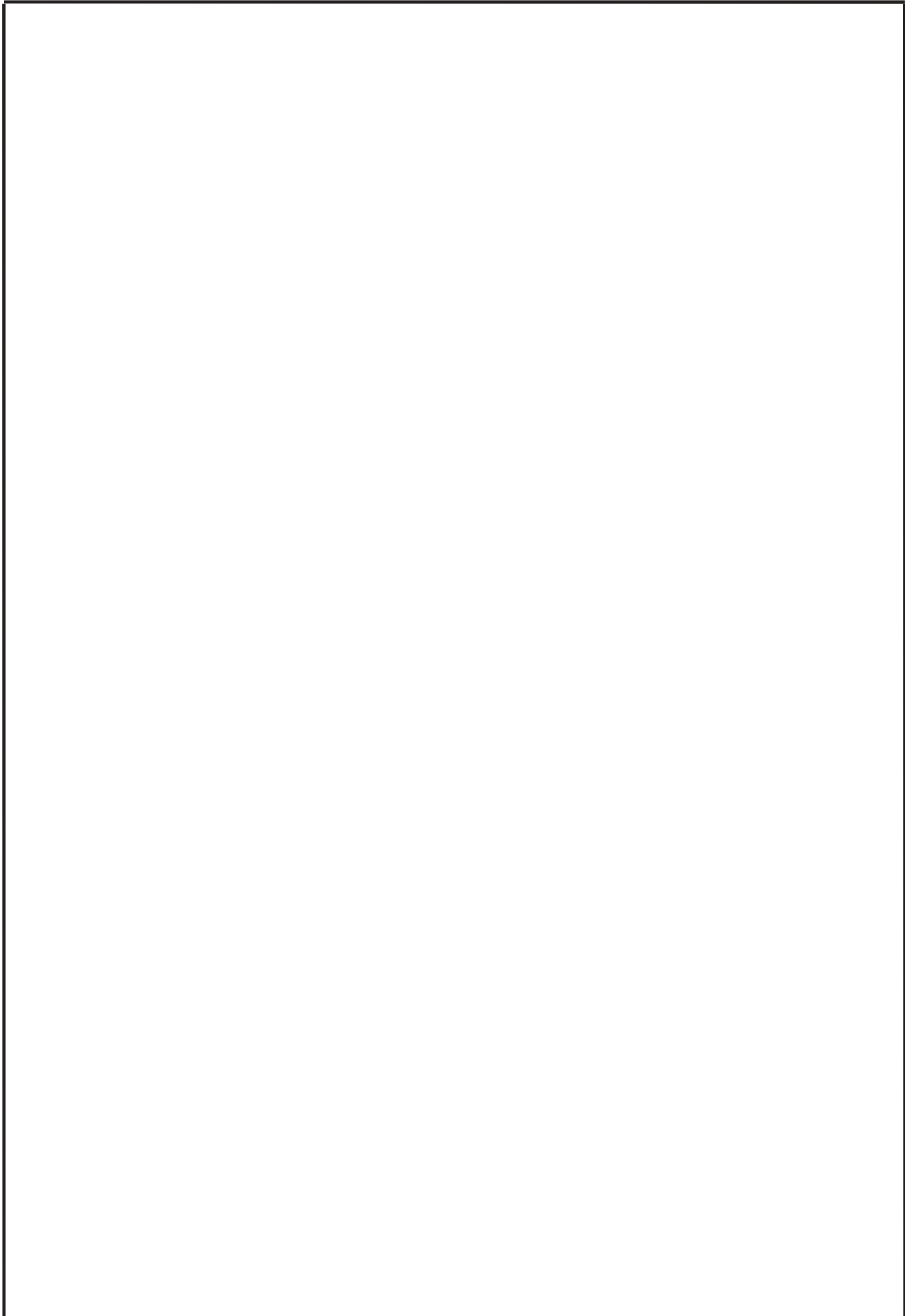
МРМА25.00.00.000 ПЗ

ДОДАТОК А

Експериментальна установка для дослідження параметрів процесу
утилізації відходів полімерних та волокнистих матеріалів

Рисунок А.1 – Дослідний зразок для утилізації відходів волокнистих
та полімерних матеріалів

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		63



					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64