

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.

ДИПЛОМНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження особливостей використання
переробленої кавової гущі в якості альтернативи
твердому паливу»

Виконав

(підпис)

Крисько В.О.
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301-1м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Чепіжний А.В.
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент _____ Чепіжний А.В.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 202__ року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Крисько Володимир Олегович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження особливостей використання переробленої кавової гущі в якості альтернативи твердому паливу

керівник роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» _____ 02 _____ 2024 р. № 572/ос

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи «11» _____ 11 _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи фізико-хімічні властивості кавової продукції, стандарти та нормативні документи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Аналіз виробництва біопалива з відходів кавової гущі.

2 Аналіз математичної моделі виробництва пелет.

3 Дослідження та застосування методу виробництва біопалива з відходів кавової гущі.

4 Охорона праці.

5 Економічний огляд вартості використання біовугілля з відходів кавової гущі.

Висновки

Список використаної літератури

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point _____

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

(Крисько В.О.)
(прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник
дипломної роботи**

_____ (підпис)

(Чепіжний А.В.)
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Дослідження особливостей використання переробленої кавової гущі в якості альтернативи твердому паливу. Магістерська робота / Крисько Володимир Олегович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 61 с.

В роботі проведено аналіз використання відходів кавової гущі в якості біопалива та альтернативи використанню твердого викопного палива. Методологію виробництва біовугілля з відходів кавової гущі було порівняно з процесом виробництва пелет.

Проведено експериментальне дослідження хімічного складу відходів кавової гущі, вмісту лігніну та його вплив під час переробки сировини, розглянуто якість і кількість виходу хімічних речовин під час згоряння біовугілля з відходів кавової гущі.

Розглянуто та проаналізовано заходи охорони праці та захист персоналу під час перероблення відходів кавової гущі в біопаливо. Запропоновано основні заходи охорони праці при виробництві біовугілля.

Виконано економічне обґрунтування використання біовугілля з відходів кавової гущі як альтернативу твердому паливу. Розраховано енергоефективність розглянутого біопалива.

Ключові слова: відходи кавової гущі, біопаливо, біовугілля, пелети, лігнін, питома теплота згоряння палива, енергоефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ.....	8
1.1 Методологія досліджень.....	9
1.2 Аналіз експериментальних даних.....	11
Висновки до розділу.....	15
2 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИРОБНИЦТВА ПЕЛЕТ.....	16
2.1 Опис і формалізація модельованого технологічного процесу.....	16
2.2 Загальна характеристика математики моделі.....	16
2.3 Моделювання ступеня пошкодження гниття деревної сировини.....	17
2.4 Моделювання змін концентрації лігніну в обробці деревини при технологічному процесі.....	18
2.5 Моделювання процесу додавання технічного лігніну.....	22
2.6 Моделювання автоматизованої системи управління процесом виробництва пелет деревної сировини, ураженої гниллю.....	24
2.7 Аналіз результатів математичного моделювання.....	27
Висновки до розділу.....	30
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ.....	32
3.1. Препарат ВКГ-біовугілля.....	34
3.2. Дослідження характеристик ВКГ та оптимізованого ВКГ- біовугілля.....	36
3.3 Розробка моделі. Генерація моделі та статистичний аналіз.....	38
3.4 Характеристика ВКГ та оптимізованого ВКГ-біовугілля. Лігноцелюлозний тест, морфологія поверхні та аналіз енергодисперсійного рентгенівського випромінювання.....	41
3.5 Приблизний і остаточний аналізи.....	44
3.6 Оцінка вартості.....	44

Висновок до розділу.....	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	47
4.1 Загальні принципи охорони праці на виробництві.....	47
4.2 Екологічні аспекти.....	47
Висновки до розділу.....	48
5 ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД ВАРТОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ.....	49
Висновки до розділу.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	56

АПК – аграрно-промисловий комплекс

ВБ – вихід біовугілля

ВЕ – вихід енергії

ВКГ – відпрацьована кавова гуща

ВТВ – вищі теплотворні властивості

ДСТУ – державний стандарт України

ЕДРВ – енергодисперсійне рентгенівське випромінювання

МПРЦКД – методологія поверхневого результату центрального композитного дизайну

ПСЕМ – полеемісійний скануючий електронний мікроскоп

ТГМ – термогравіметричний

ФПЧ – інфрачервоний спектроскоп з перетворенням Фур'є

ВСТУП

Сучасне суспільство стикається з дедалі більшими екологічними проблемами, серед яких особливе місце посідає проблема використання відновлюваних джерел енергії та скорочення викидів парникових газів. Перспективним напрямком у цьому контексті є використання вторинної сировини, особливо переробленої кавової гущі, яка значною мірою є відходами виробництва кавових напоїв.

Кавова гуща, яка може завдати шкоди навколишньому середовищу при утилізації, може стати корисним ресурсом для виробництва енергії. В останні роки зростає інтерес до його використання як альтернативи традиційному твердому, рідкому та газоподібному паливу. Це відкриває можливості для зменшення застосування та впровадженості такого ресурсу який є природнім і значного впливаючого ефекту на середовище, що нас навколо оточує.

Оскільки людське населення досягло нового максимуму в 7,8 мільярда, потреба в їжі, енергії та інших ресурсах неухильно зростає в останні роки. Таким чином, в останні роки набагато більше зусиль було зосереджено на дослідженнях сталого виробництва енергії з відходів через зростаючий глобальний попит на енергію, а також дефіцит викопного палива [1]. Виходячи з поточних запасів у 1,7 трильйона барелів нафти, 6951,8 трильйона кубічних футів газу та 1055 трильйона тонн вугілля, цих запасів може вистачити лише на 50, 50,9 та 132 роки відповідно. Крім того, споживання викопного палива також призводить до викидів парникових газів, що призводить до приблизно 415 частин на мільйон вуглекислого газу в поточній атмосфері [3], що призводить до катастрофічних екологічних подій, таких як зміна клімату та глобальне потепління.

Як життєздатна альтернатива викопному паливу, біоенергетика постає як одне з нових втілень відновлюваної енергії, оскільки вона пропонує різні фази біопалива, такі як рідина (біодизель і біонафта), газ (синтез-газ) і тверді

продукти (біовугілля) [6]. Біовугілля або біовугілля як біопаливо є одним із найменш досліджених, незважаючи на такі переваги, як простота виробництва, пряме застосування в котлі та краща здатність до зберігання порівняно з біомасою [8,9]. Серед доступних термохімічних методів піролізу є найкращим і загальноприйнятим способом виробництва біовугілля завдяки високій якості продукції та високому виходу твердих речовин.

Численні лігноцелюлозні матеріали, такі як сільськогосподарські та харчові відходи, мають високий енергетичний вміст [11] і можуть бути перетворені на тверде біопаливо за допомогою технологій піролізу, включаючи відходи олійної пальми, стебла бавовнику, рисове лушпиння [14] і відходи граната. . Загалом біовугілля має більші переваги у фізико-хімічних властивостях, таких як низький вміст вологи, низька неоднорідність, висока горючість і подрібнення порівняно з чистою біомасою як безпосереднім паливом [10,17]. Тому на поточному етапі досліджень необхідно отримати сировину для виробництва біовугілля, яка відповідає критеріям дешевизни, відновлюваності та стійкості протягом тривалого періоду часу.

Це дослідження розглядає потенціал переробленої кавової гущі як відновлюваного джерела енергії та потенціал для заміни традиційного твердого палива. Актуальність проблеми полягає в необхідності пошуку ефективних та стійких рішень для підтримки екологічної стійкості та забезпечення енергетичної безпеки.

1 АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ

Дослідження використання відпрацьованої кавової гущі в якості палива привернуло увагу вчених з різних наукових галузей, таких як енергетика, екологія, хімія і технології.

Вчені займалися питаннями оцінки кавової гущі в якості вторинного ресурсу для автомобільного транспорту. В своїх роботах докладно було розглянуто та проаналізовано ринок кави та продуктів з кави. Також в своїх наукових дослідженнях розглядали можливість використання кавової гущі в паливних брикетах як альтернативу деревині.



Рисунок 1.1 – паливний брикет сферичної форми з кавової гущі

Було доведено, що сферичні паливні брикети, які виготовляються з відходів кавової гущі, є екологічно чистим джерелом енергії; порівняно з деревиною та деревним вугіллям, дані брикети швидше поглинають вуглець та більш економічні в фінансовому еквіваленті.

Деякі науковці в дослідженнях розглядали схему отримання біопалива з відходів кавової гущі щодо заміни синтетичних полімерів біорозкладаними матеріалами, особливо тими, що отримані з природних ресурсів. ВКГ може бути універсальною сировиною за своїм складом. Технологія та практика для прямого повторного використання ВКГ, зазвичай є дешевим та практичним.

Валоризація ВКГ призведе до перенаправлення відходів і збереження ресурсів. В даний час багато з цих технологій валоризації все ще знаходяться на лабораторній стадії. Щоб скоротити кількість SCG як відходів, необхідний правильний вибір продуктів/процесів.

1.1 Методологія досліджень

Огляд дослідницьких робіт: дослідження, які було проведено і розглянуто попередньо, встановили різноманітність підходів до використання відпрацьованої кавової гущі як палива. Вони охоплювали різні аспекти, такі як технології переробки, енергетичні характеристики та екологічний вплив цього процесу. Основні напрямки попередніх досліджень включають використання кавової гущі для виробництва біопалива, генерації тепла та електроенергії.

Проведення експериментів: для вивчення можливостей використання кавової гущі як палива проводилися експерименти з визначенням її калорійності, здатності до згоряння та видобутку енергії. Використовувались різні методи переробки, такі як піроліз, газифікація та біопаливні технології, для оцінки ефективності і практичної придатності кавової гущі для виробництва енергії.

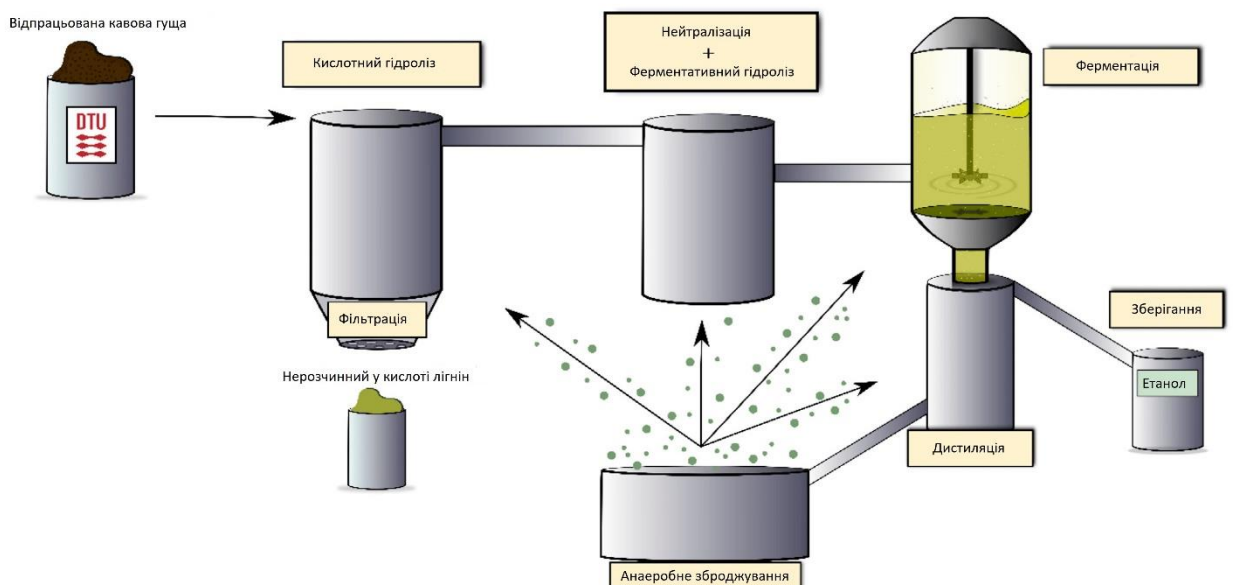


Рисунок 1.2 – метод переробки кавової гущі в біопаливо

Умови експериментів: експериментальні умови включали контрольовані параметри, такі як температура, час переробки, склад вихідних компонентів кавової гущі тощо. Це дозволило дослідникам систематично оцінити вплив різних факторів на якість та кількість отримуваної енергії.

Технології і обладнання: використані технології включали в себе високотемпературні реактори, спеціалізовані біопаливні установки та інші високоефективні системи для переробки біомаси. Важливою складовою було не лише досягнення максимального видобутку енергії, але і мінімізація викидів та впливу на навколишнє середовище.



Рисунок 1.3 – високотемпературний реактор

Методи аналізу і оцінки: для оцінки ефективності використання кавової гущі як палива використовувалися різні методи аналізу. Вони включали в себе не лише вимірювання калорійності та здатності до згоряння матеріалу, але й оцінку викидів CO_2 та інших забруднювачів. Для цього використовувались спеціалізовані прилади та аналітичні методи, які дозволяли точно визначити екологічний вплив процесу переробки кавової гущі.

Контрольні експерименти: для підтвердження достовірності отриманих результатів проводились контрольні експерименти. Вони включали повторення основних досліджень за тими ж умовами, а також

порівняння з іншими відомими матеріалами та паливними ресурсами. Це дозволило підтвердити відновлювальні властивості кавової гущі та її потенціал як ефективного біопалива.

Статистичний аналіз: отримані дані піддавалися статистичному аналізу для визначення ступеня варіабельності результатів та надійності отриманих висновків. Використовувалися методи середньої квадратичної помилки, аналізу варіансів та інші статистичні підходи для обґрунтування наукових результатів досліджень.

Цей опис методології досліджень дозволяє зрозуміти, що для вивчення використання відпрацьованої кавової гущі як палива використовувалися комплексні підходи, які охоплювали як енергетичні, так і екологічні аспекти процесу.

1.2 Аналіз експериментальних даних

Основні результати експериментів: В результаті досліджень було встановлено, що кавова гуща виявляє значний потенціал як відновлюване джерело енергії. Зокрема, були отримані дані про калорійність кавової гущі, яка становить приблизно X ккал/кг, що дозволяє ефективно використовувати її для виробництва тепла та електроенергії.

Оцінка ефективності: порівняльний аналіз показав, що ефективність використання кавової гущі залежить від методів її переробки. Наприклад, процес піролізу дозволяє отримати більше енергії у порівнянні з іншими методами.

Ефект впливу на оточуючо-наволишне середовище: важливим аспектом досліджень було визначення викидів CO_2 та інших забруднювачів під час спалювання кавової гущі. Виявлено, що при правильній технології переробки ефект впливу на оточуючо-наволишне середовище може бути значно знижений порівняно з традиційними видами палива.

Перспективи використання: на основі аналізу експериментальних даних робляться висновки про перспективи використання відпрацьованої

кавової гущі як палива. Цей матеріал має потенціал стати важливим компонентом в системі енергетичних джерел що мають властивість відновлюваності, що сприятиме зменшенню використання традиційних вугільних та нафтових ресурсів.

Аналіз витрат і прибутків: також проводився аналіз економічної вигідності використання кавової гущі як палива. Виявлено, що в деяких випадках вона може бути конкурентоспроможною альтернативою традиційним паливам, особливо у регіонах з високим рівнем використання кави.

Порівняння з іншими видами палива: для більш глибокого розуміння ефективності використання кавової гущі як палива проводилося порівняння з іншими відомими ресурсо-енергетичними джерелами, такими як природній елемент вугілля, хімічно-природний газ та біомаса інших видів. Виявлено, що кавова гуща може мати переваги у відношенні до викидів парникових газів та інших негативних екологічних впливів.

Технологічні виклики і можливості: аналіз даних також включав оцінку технологічних викликів, пов'язаних із використанням кавової гущі. Це включало в себе аспекти ефективності виробництва, логістики та можливості масштабування технологій виробництва біопалива на основі кавової гущі.

Довгострокові перспективи: на основі аналізу експериментальних даних формулюються довгострокові перспективи використання кавової гущі як палива. Це включає розвиток нових технологій переробки, вдосконалення енергетичної ефективності та збільшення конкурентоспроможності цього джерела енергії на ринку.

Виклики та ризики: важливою частиною аналізу є визначення потенційних викликів та ризиків, пов'язаних з використанням кавової гущі як палива. Це включає економічні, технологічні та екологічні аспекти, які можуть впливати на реалізацію проектів з виробництва біопалива на основі кавової гущі.

Цей розділ надає більш глибокий і деталізований аналіз експериментальних даних та їх інтерпретацію щодо використання кавової гущі як палива, включаючи порівняння з іншими видами палива, технологічні виклики, довгострокові перспективи та потенційні ризики.

Залишки після виробництва/використання кавових продуктів, що називається кавовою гущею, та утворюється як залишок після варіння кави. Ураховуючи, що в діапазоні від 0% до 1% кавових сполучень вивільняється під час процесу заварювання, а також беручи до уваги об'ємні обсяги споживчого товару кави, що є затребуваним у всьому світі, виявляється велика кількість ВКГ щороку. Масова частка кількості ВКГ застосовується як добриво, але є підвищення зацікавленості до використання згаданої сировини в сфері науки як біоекономіка, зокрема для отримання цінних сполук. На сьогоднішній день найпопулярнішим шляхом застосування ВКГ є її використання як паливного енергоресурсу з метою виробництва енергії теплової.

Методи валоризації ВКГ значно лежать в залежності від таких факторів як місце та метод її виробництва. Підприємства обширних масштабів, які займаються виробництвом кави розчинної, в процесі виробництва утворюють значні об'єми ВКГ, які концентруються в одному місці. Було розглянуто, що певна кількість підприємств застосували спеціалізовані біомасові котли, що застосовують ВКГ, інші різновиди біомаси що використовують для отримання пари чи розігрітих газів для внутрішніх потреб.

Для невеликих споживачів кави, таких як кафетерії та домогосподарства, кавова гуща частіше є "харчовим відходом", аніж технологічним залишком. Збір і використання цієї гущі складніше через розпорошеність малих обсягів в багатьох місцях. Однак, існують різні ініціативні проекти, що ставлять за мету вирішення цієї проблеми. Наприклад, компанія Bio-bean з Об'єднаного Королівства веде ділові відносини з значною кількістю кафетеріїв з метою збирання та процесу переробки ВКГ. У 2021 році було зібрано 6412 тон ВКГ.

Корпорація вивчає різні шляхи валоризації цього матеріалу, такі як виробництво брикетів та гранул з ВКГ.

Проект Kafsimo в Греції є ще одним прикладом, де з кавової гущі виробляють гранули. Ці гранули, як правило, мають вищий фізичний параметр як теплотворна здатність у порівнянні із стандартними гранулами з деревини, але є вірогідність вмісту більшої кількості сірки та хлору.

Компанія Bio-bean є однією з провідних компаній у сфері використання кавової гущі в біоекономіці, зокрема для виробництва біопалива. Ключові фактори діяльності компанії Bio-bean:

- Заснування і місія: Bio-bean була заснована в 2013 році в Лондоні, Велика Британія. Основна місія компанії полягає в тому, щоб перетворювати кавову гущу у цінні продукти, зменшуючи відходи і сприяючи сталому розвитку.
- Технології переробки: Компанія використовує спеціальні технології для переробки відпрацьованої кавової гущі на різноманітні продукти, включаючи біопаливо, біопластик і біопродукти для сільського господарства.
- Проекти та ініціативи: Bio-bean співпрацює з різними секторами, включаючи кафетерії, ресторани, а також місцеві влади, для збору великих обсягів кавової гущі. У 2021 році компанія зібрала 6400 тонн кавової гущі від партнерів по всій Великобританії.
- Продукція: Одним із ключових продуктів Bio-bean є Coffee Logs – кавовогущані брикети, які застосовуються альтернативним ресурсом замість дров для опалення. Крім того, вони виробляють кавові гранули, що використовуються у комерційних секторах.
- Інновації та розвиток: Компанія постійно вдосконалює свої технології і досліджує нові можливості валоризації кавової гущі. Вони активно досліджують можливості для розширення своїх операцій за межами Великобританії.

Загалом, Bio-bean відома своїми інноваціями в області використання кавової гущі та має значний вплив на стале використання цього біологічного відходу.

Висновок до розділу

Під час досліджень було оцінено витрачені кавові залишки як потенційне джерело для виробництва біодизелю та його побічних продуктів у вигляді пелет. Вилучення олії за допомогою суміші гексан/ізопропанол (50:50 об/об), що дозволило отримати більше відновлення олії (21,5%) за відносно низьку вартість, було перетворено на біодизель з виходом 82%. Аналізи GC показали, що біодизель, отриманий з витрачених кавових залишків, складався як з насичених (47,1%), так і з ненасичених (51,2%) ефірів. Якість отриманого біодизелю була оцінена відповідно до стандарту ДСТУ, що показало, що отриманий біодизель відповідає стандартним обмеженням для всіх оцінюваних параметрів за винятком вмісту залишкового вуглецю.

Тверді відходи, що залишаються після вилучення олії та гліцерину, які є побічними продуктами виробництва біодизелю, експериментально підтверджено як перспективні сировини для виробництва пелет палива (21,6 МДж/кг). Виробництво твердих відходів після вилучення олії та гліцерину пелет також може сприяти застосуванню підходу "нульового відходу" у виробництві біодизелю та уникнути витрат на утилізацію сирої гліцерину. Ця робота дозволить отримати нові уявлення про виробництво біопалив без вирощування рослин та/або перетворення їжі на паливо.

2 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИРОБНИЦТВА ПЕЛЕТ

2.1 Опис і формалізація модельованого технологічного процесу

Технологічний процес виробництва пелет включає перелік таких операцій (рис. 1):

1) грубе подрібнення - деревина надходить на подрібнювач, де подрібнюється до розміру частинок 25x25x2 мм, а потім надходить у завантажувальний бункер;

2) сушіння - подрібнена деревна тріска із завантажувального бункера конвеєром надходить у сушильний барабан, де підсушується гарячим повітрям від теплогенератора до вологості $10\pm 2\%$;

3) дрібне подрібнення - від сушіння барабан, стружка транспортується через циклон до молоткова дробарка, де вона подрібнюється до частинок розміром не більше 5 мм і подається в резервуар для сухої сировини;

4) грануляція - з бункера деревна сировина надходить на грануляційний прес, в якому гранули пресуються під впливом високого тиску і температури;

5) охолодження – для отримання високоякісних гранул продукту (пелет)

Після виходу з прес-гранулятора необхідно охолонути, гранули по конвеєру рухаються до колони охолодження;

6) пакування – готова продукція пакується на пакувальній лінії.

2.2 Загальна характеристика математики моделі

Формальна модель сортименту – двовимірний випадковий процес, що характеризує зміну концентрації лігніну в розглянутому плоскому поздовжньому перерізі (рис. 2)

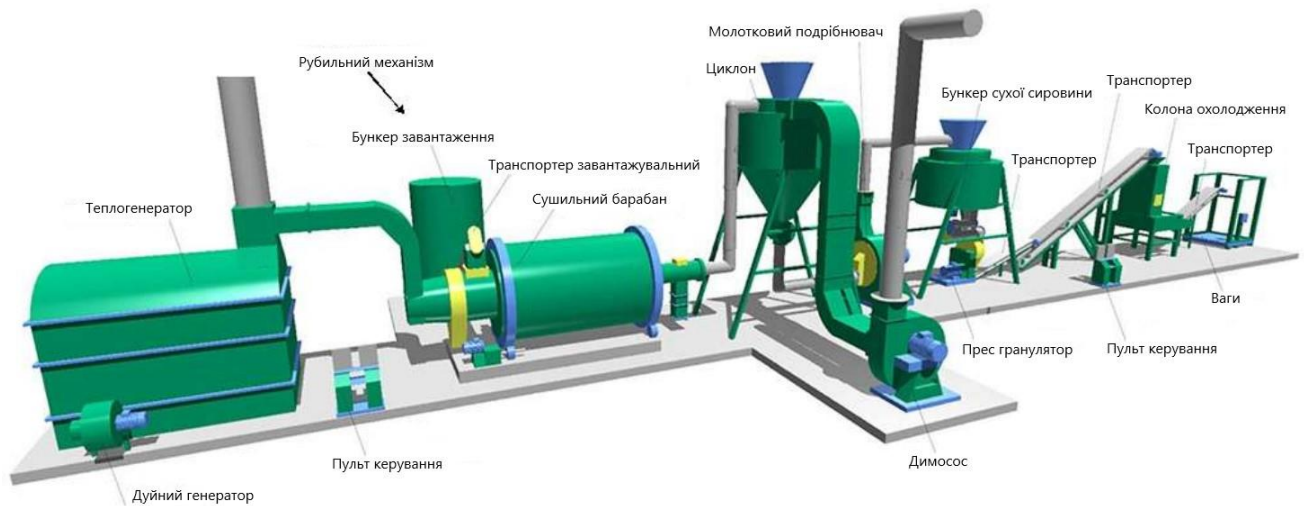


Рисунок 2.1 Схема технологічного процесу виробництва пелет

2.3 Моделювання ступеня пошкодження гниття деревної сировини

Вражений гнилої деревини, що потрапляє в гранули продукція в сортиментному вигляді характеризується різним ступенем ураження гнилями. При цьому задня частина деревини можуть бути повністю уражені гниллю, а на висоті 6–8 м деревини вже достатньо здоровий. На виробництві сосни уражені сосною губкою, а ялини коренева губка. Ці грибки вражають коріння і спину дерева до вис 3 – 4 м, а іноді до 8 – 10 м. Відповідно, в оброблених сортиментах поверхні з різним ступенем уражені гниллю та з різним вмістом лігніну. Кількість ураженої гниллю деревини в сортименті, ступінь пошкодження гниллю і її розподіл за об'ємом асортимент залежить від віку, породи, близькість сортименту до торця дерева і інші фактори. У процесі моделювання розглядався середній розподіл ураженої гниллю деревини в сортиментах різної довжини, діаграма, на якій зображено на рис. 3.

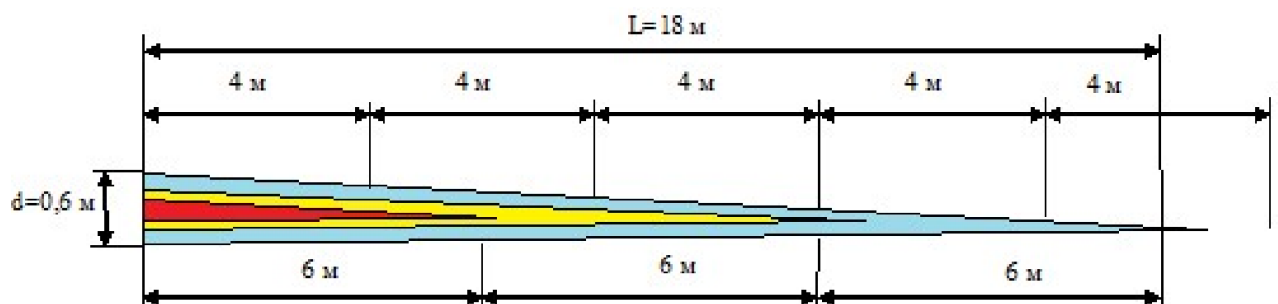


Рисунок 2.2 Схема ураження гниллю сортиментів

1. Створення загальних ознак асортименту з урахуванням коефіцієнтів кореляції, зокрема:

- L – довжина сортаменту;
- d – діаметр сортаменту в затупленому перерізі;
- $C = L/d$ – звуження асортименту;
- загальний ступінь ураження гниллю, характеризується середнім вмістом лігніну;
- порода;
- розташування в стовбурі дерева, визначається висотою стикового зрізу сортаменту у стовбурі дерева.

Врахування коефіцієнтів кореляції сформованих атрибутів реалізується шляхом коригування параметрів законів розподілу, породжених наступними випадкові величини за результатами генерації попередніх.

2. На основі згенерованих загальних ознак асортименту генерується двовимірний нестационарний випадковий процес, що характеризує вміст лігніну в окремі елементарні ділянки асортиментної моделі району. Вибирається розмір модельованих елементарних ділянок на основі розміру частинок деревини, що надходять у грануляцію 2 мм в діаметрі.

3. Створення асортименту продукції для обробки, що включає додавання двох додаткових атрибутів, визначення асортиментного номера в ряду та з якого кінця (низу чи зверху) почнеться його обробка.

2.4 Моделювання змін концентрації лігніну в обробці деревини при технологічному процесі

Зміна концентрації лігніну в обробленій деревині під час технологічного процесу виробництва пелет відбувається в результаті операцій подрібнення та змішування, які здійснюються (рис. 1) у подрібнювачі, завантажувальному бункері, сушильному барабані, циклоні, молотку дробарка, бункер для сухої

Початковий потік деревної сировини утворюють окремі асортименти у формі раніше описаної моделі. Сортимент може надходити в рубальну машину як з ураженої гниллю сторони сідниці і зі здорового боку топи. У подрібнювачі стовбур дерева розбивається на нові плоскі елементи різного розміру, змодельовані в відповідно до статистичного розподілу розмірів мікросхем. У цьому випадку поділ вихідного сортименту на частинки стружки здійснюється по межах попередньо змодельованих елементарних областей.

Поверхневі моделі частинок стружки, отримані моделюванням від подрібнення сортименту, транспортуються в резервуар-накопичувач, де створюються шари подрібненої деревини з різним ступенем тління. Моделювання формування шарів стружки в резервуарі-накопичувачі здійснюється з урахуванням кута природного нахилу деревної тріски, в купі буде послідовне заповнення резервуару моделі бункерів з моделями частинок деревної стружки з урахуванням їх випадкового розміщення у ймовірних зонах. При моделюванні для кожного охочого бункерних частинок визначалися ймовірністю його остаточне розташування з урахуванням розташування частинок стружки, які раніше надійшли в стопку. Визначено кінцеве положення частинки чіпа шляхом генерації випадкової змінної.

Оскільки частинки стружки конвеєром рівномірно видаляються з бункера, відбувається також перерозподіл і змішування окремих елементів потоку переробленої деревної сировини. Деревна стружка рухається в сушильний барабан вздовж барабана і переміщується.

На виході до прес-гранулятора в моделі плоского потоку спостерігається випадковий процес зміни концентрації лігніну обробленої деревини. Процес молоткового шліфування дробарка моделюється подібно до процесу подрібнення в дробарці, це спричиняє відокремлення частинок деревної стружки до основних областей, які трохи переплутані під час подачі в пресовий гранулятор. У прес-грануляторі утворюються ці елементарні області моделі з плоскими гранулами. Для кожної моделі пелет на основі вмісту лігніну в окремих елементарних ділянках деревної сировини, з якої вони

виготовлені, розраховується середній вміст лігніну, який використовується для оцінки того, наскільки він відповідає вимогам стандартів. Отже нерівномірність вмісту лігніну в сировині під час технологічних операцій таким чином трансформується в нерівномірність його вмісту в кінцевому продукті – пелетах.

Для отримання пелет високої якості необхідно, щоб вміст лігніну в сировині становив не менше 30%. Для цього в оброблену деревну сировину, уражену гниллю, перед подрібненням додають технічний лігнін, що дозволить значно зменшити кількість гранул, не відповідає вимогам стандартів на міцність і стирання. Однак, враховуючи висока зольність технічного лігніну, також зростає зольність продукції, що випускається з пелет. Щоб уникнути неприйняттого збільшення вмісту золи в пелетах має важливе значення контролювати вміст лігніну в переробленій деревній сировині.

В результаті серії обчислювальних експериментів отримані дані, що характеризують випадковий процес зміни концентрація лігніну в обробленому матеріалі деревини, на підставі яких технічні вимоги до системи автоматичного контролю вмісту лігніну та автоматична система додавання технічного лігніну в масу деревини, що надходить в дробарку (рис. 8):

X – вміст лігніну в пошкоджених гниллю деревних пелетах без додаванням елементу, як технічний лігнін; $X_{\text{рівн}}$ – вміст елементу лігнін в пелетах від гниття деревини з неперевіреною уніформною додавання технічного лігніну; $X_{\text{контр}}$ - вміст лігніну в уражених гниллю деревних пелетах з контрольованим додаванням технічного лігніну.

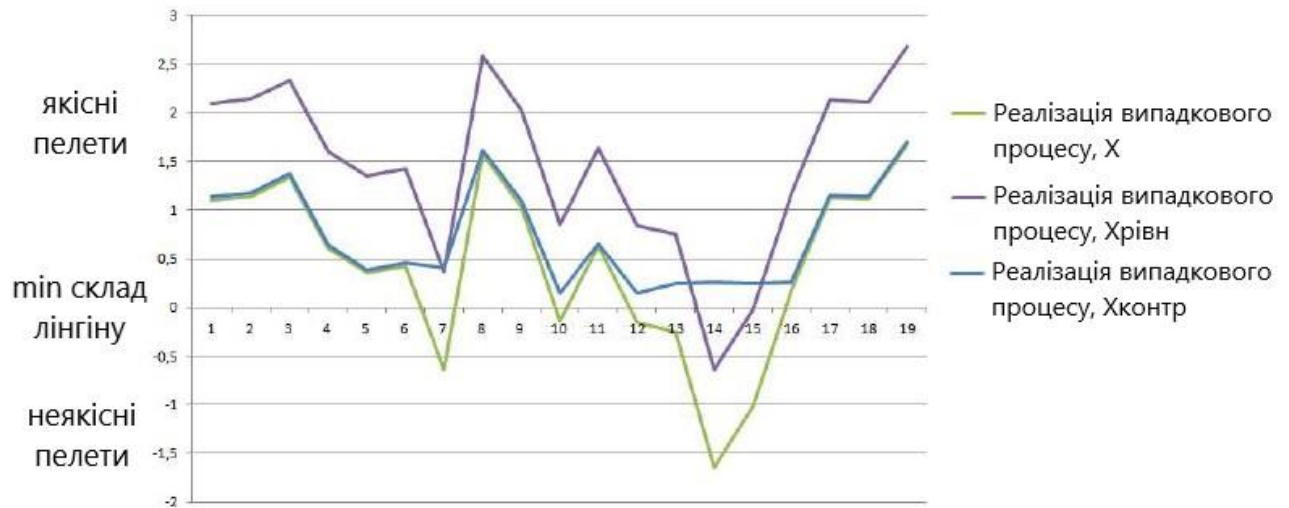


Рисунок 2.4 Зміни концентрації лігніну в деревині, що переробляється

Пряме використання враженої гниллю деревини в технічному процесі забезпечує вихід до 60% бракованих виробів, рівномірне додавання 20 % маси перед подрібненням, додавання технічного лігніну забезпечує необхідну міцність і абразивність пелет, однак їх зольність перевищує дійсні значення.

Моделювання рівномірного додавання технічного лігніну при переробці деревної сировини, ураженої гниллю, який найбільше підходить для реалізації перед подрібненням, з одного боку, дозволяє значно зменшити кількість отриманих гранул з недостатнім вмістом лігніну, а з іншого, за рахунок параметру як висока зольність технічного лігніну.

Також зростає зольність продукції, що випускається пелети щоб уникнути неприпустимого збільшення вмісту золи в пелетах, технічний лігнін доцільно додавати тільки при надходженні в дробарку стружки гниючої деревини зі зниженим вмістом лігніну. Для реалізації цього методу необхідно контролювати вміст лігніну в переробленій деревній сировині.

2.5 Моделювання процесу додавання технічного лігніну

Швидкість витіку лігніну:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} \sqrt{2gh} = C \sqrt{2gh} \quad (2.1)$$

де y – коефіцієнт опору; h – висота накопичувального бака; C – коефіцієнт швидкості; g – прискорення вільного падіння тіла.

Високий рівень лігніну в бункері-зберігання дорівнює:

$$H = \left[\frac{5}{2B} t + h^{\frac{2}{5}} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (2.2)$$

де $B = \left[-\frac{\pi R^2 H^2}{h^2 C_d d \sqrt{2g}} \right]$; R – радіус бункера-зберігання; C_d – коефіцієнт

витоку лігніна; d – діаметр отвору бункера-зберігання.

Зміна рівня лігніна в бункері-зберігання

$$dH = \frac{1}{A} (q_1 - q_2) dt \quad (2.3)$$

де $A(H) \frac{dH}{dt} = C_d d \sqrt{2gh} H^{\frac{1}{2}}$, q_1 , q_2 – маса на вході та виході бункера-зберігання.

Система контролю рівня лігніну (подібно до [12, с. 6]) включає:

1) передача функцій багатомоторних приводів у вигляді аперіодичного зв'язку першого порядку;

2) приводи (двигуни 1, 2 з параметрами швидкості обертання шнека лігніну та швидкості обертання вентилятора ГВП повітря в сушильну камеру).

В області робочої частини механічні характеристики, регулювання швидкості багатьох моторних приводів, тобто функція передачі двигуна через частотний канал джерело живлення - швидкість обертання включає добуток двох складових. Перший компонент описує електромеханічні компоненти, а другий описує механічні компоненти. Обидва є аперіодичними зв'язками першого порядку

$$W_1 = \frac{K_{\text{двиг}}}{T_{ep} + 1}; \quad W_2 = \frac{K}{T_p + 1} \quad (2.4)$$

де $K_{\text{двиг}} = 2,54$; $T_{ep} = 0,024$ с; $T_p = 0,07$ с.

$$W_{\text{двиг}} = \frac{K_{\text{двиг}} K}{(T_{ep} + 1)(T_p + 1)}$$

Тиристорний перетворювач із системою імпульсно-фазового управління силовими елементами має передатну функцію наступного виду:

$$W_{ТП} = \frac{K_{пр} e^{\tau p}}{T_y p + 1} \quad (2.5)$$

де $K_{пр} = 1$; $\tau = 0$; $T_y = 0,008$ с.

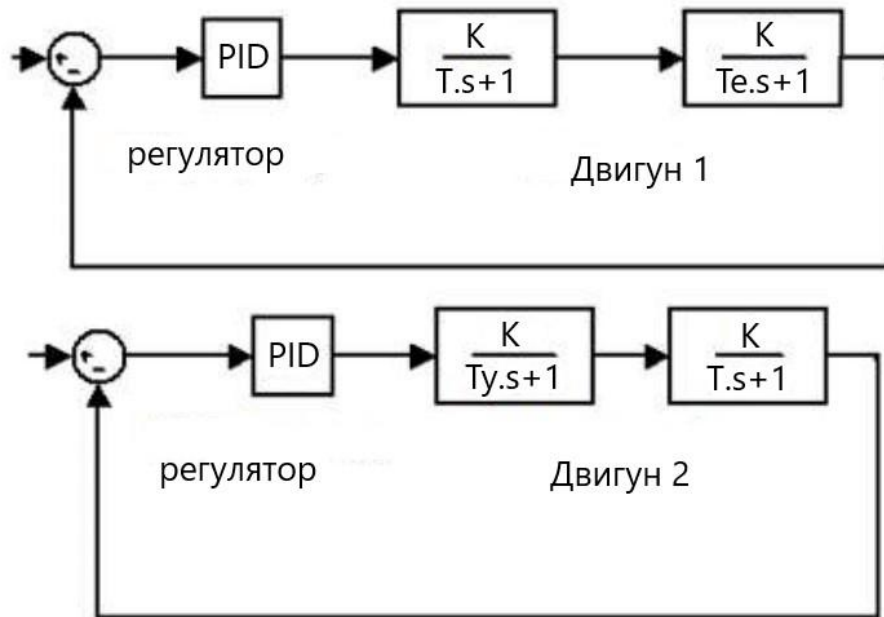


Рисунок 2.5 Системи зворотного зв'язку двигунів 1,2

2.6 Моделювання автоматизованої системи управління процесом виробництва пелет деревної сировини, ураженої гниллю

Однією з причин, що ускладнює виробництво пелет з гнилі деревної сировини із заданими властивостями є помилка в дозуванні технічного лігніну, яка має випадковий характер. Це через необхідно швидке і точне визначення вологості деревної сировини з метою визначення ступеня ураження деревини гниллю. Для усунення цього фактора необхідно вдосконалити методику визначення вологості деревної сировини та систему контролю дозування технічного лігніну.

На рисунку 10 наведена схема технологічного процесу виробництва паливних пелет з гнилої деревної сировини. Ввід x тут вміст лігніну в

оброблених постраждалих гниття деревної сировини, вихід y – вміст лігніну в подрібненій сировині, в суміші з технічним лігніном.

Сигнали a, b, c вказують на похибку регулювання, керуючий сигнал і керуючий вплив приводу на об'єкт (ворота з дозатором) відповідно.

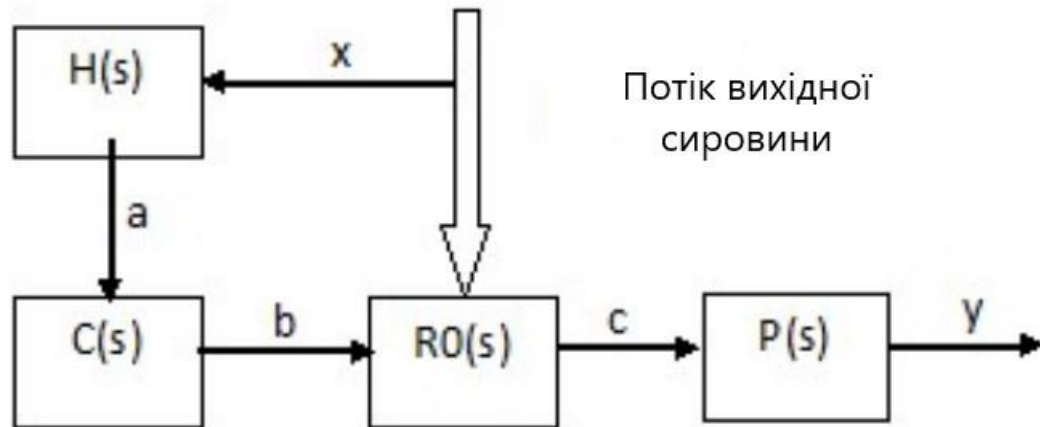


Рисунок 2.6 Схема системи керування виробництвом паливних пелет з ураженого гниллю деревної сировини: $H(s)$ – вимірювальний прилад (аналізатор); $C(s)$ – керуючий пристрій (регулятор); $RO(s)$ – виконавчий пристрій (привод); $P(s)$ – об'єкт керування (шлюз з дозатором).

Для виробництва якісних пелет необхідно регулювати їх кількість поставлено технічний лігнін. Для досягнення поставленої мети необхідно підвищити якість процесу управління. Тому важливо змодельовати контур керування приводом і внести відповідні корекції швидкості приводу про фізико-механічні властивості лігніну, з різною продуктивністю (швидкість приводу воріт з дозатором).

При дослідженні системи керування виробництвом пелет з деревної сировини, ураженої гниллю, витрата лігніну на вході складала $Q_2 - m_{ex}$ та вихід із воріт $Q_1 - m_{eux}$, яка залежить від швидкості дозатора ω_1 і швидкість приводу подачі ω_2 .

Шлюз роторного дозатора має циліндричну форму. Основні параметри показані на рис. 11.

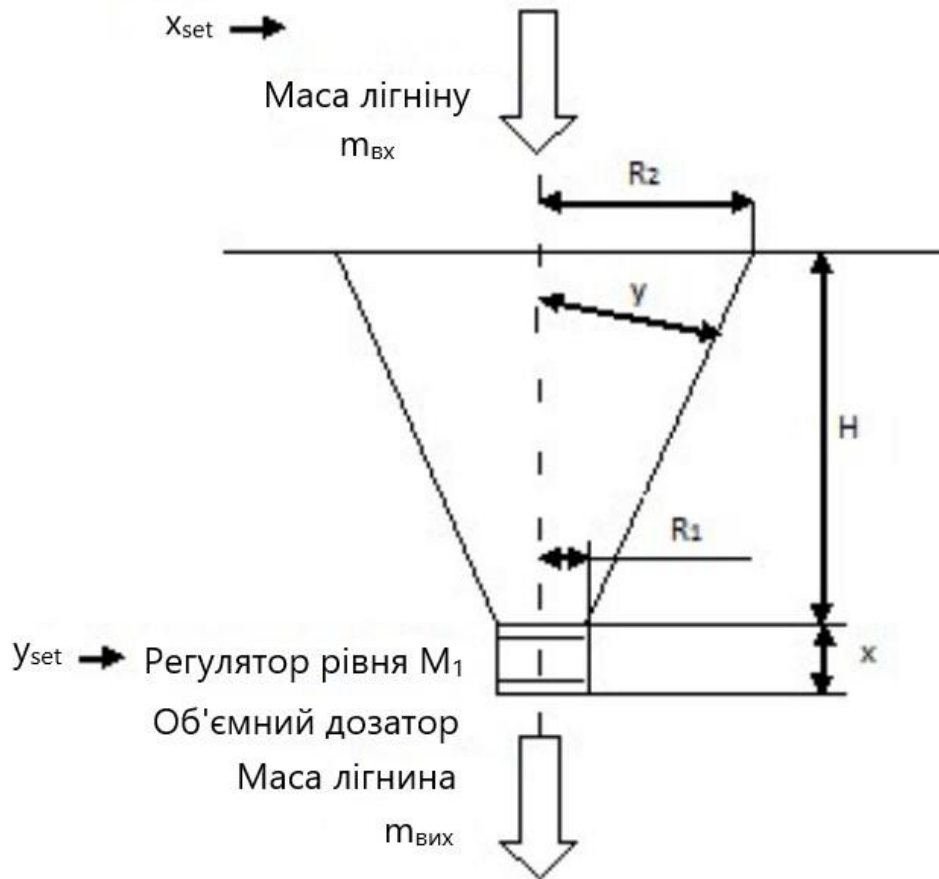


Рисунок 2.7 Параметри системи керування процесом об'ємного дозування лігніна.

Об'єм шлюза дорівнює:

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) \quad (2.6)$$

де h – висота шлюза; R_1 – радіус конуса шлюза; R_2 – радіус циліндра шлюза.

Об'ємна витрата лігніна:

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{лігніну}}} \quad (2.7)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\omega_2 Q_2 - \omega_1 Q_1}{\rho_{\text{лігніну}} \left(\frac{1}{3} \pi h \right) \left(\frac{R_1}{\varphi} \right) \left[R_1 + \frac{2R_1}{\varphi} (H + \varphi) \right]}$$

ω_2 – швидкість привода живильника; ω_1 – швидкість дозатора; Q_2 – об'ємна витрата від живильника; Q_1 – об'ємна витрата від дозатора; $\rho_{\text{лігніна}}$ – густина лігніна.

Передатна функція рівня бурого вугілля в шлюзі з урахуванням швидкості приводні та фізико-механічні властивості лігніну:

$$h(s) = \frac{\omega_2(s)\rho_{\text{лігніну}}c_2(s) - \omega_1(s)\rho_{\text{лігніну}}c_1(s)}{A\rho_{\text{лігніну}}s} \quad (2.8)$$

Передаточна функція для швидкості приводів:

$$\frac{\omega_1(s)}{\omega_2(s)} = \frac{A\rho_{\text{лігніну}}s \cdot h(s)}{c_2(s)} + C_1(s) \quad (2.9)$$

2.7 Аналіз результатів математичного моделювання

Уражена гниллю деревина містить менше лігніну, і чим більше ступінь гнилі, тим сильніше зменшення. Зменшений вміст лігніну, який є основним сполучним при грануляції, негативний фактор впливає на механічну міцність і стійкість до стирання пелет, які є стандартизованими характеристиками. Мінімум, встановлений практикою необхідний вміст лігніну в деревній сировині для отримання якісних пелет, становить 30%.

Для отримання гранул, що відповідають стандартам міцності і подрібнення в сировину перед експлуатацією помелу, додається технічний лігнін. Однак забезпечується рівномірне додавання технічного лігніну в оброблюваний матеріал деревна сировина, уражена гниллю, призводить до збільшення вмісту золи в гранулах вище допустимого значення.

Для вирішення проблеми з неприпустимим підвищенням зольності в гранулах необхідно передбачити систему автоматичного контролю додавання технічного лігніну до деревної маси, що надходить у подрібнювач залежно від сорту гниття сировини.

Контролювати процес дозування гнилої сировини та лігніну було можливо за допомогою розробленню апаратно-програмного комплексу (АПК) з використанням графічного середовища програмування LabVIEW (рис. 12). Його мета – вивчити вплив параметру частота дискретизації гнилої сировини для індикаторів вологість подрібненої суміші.

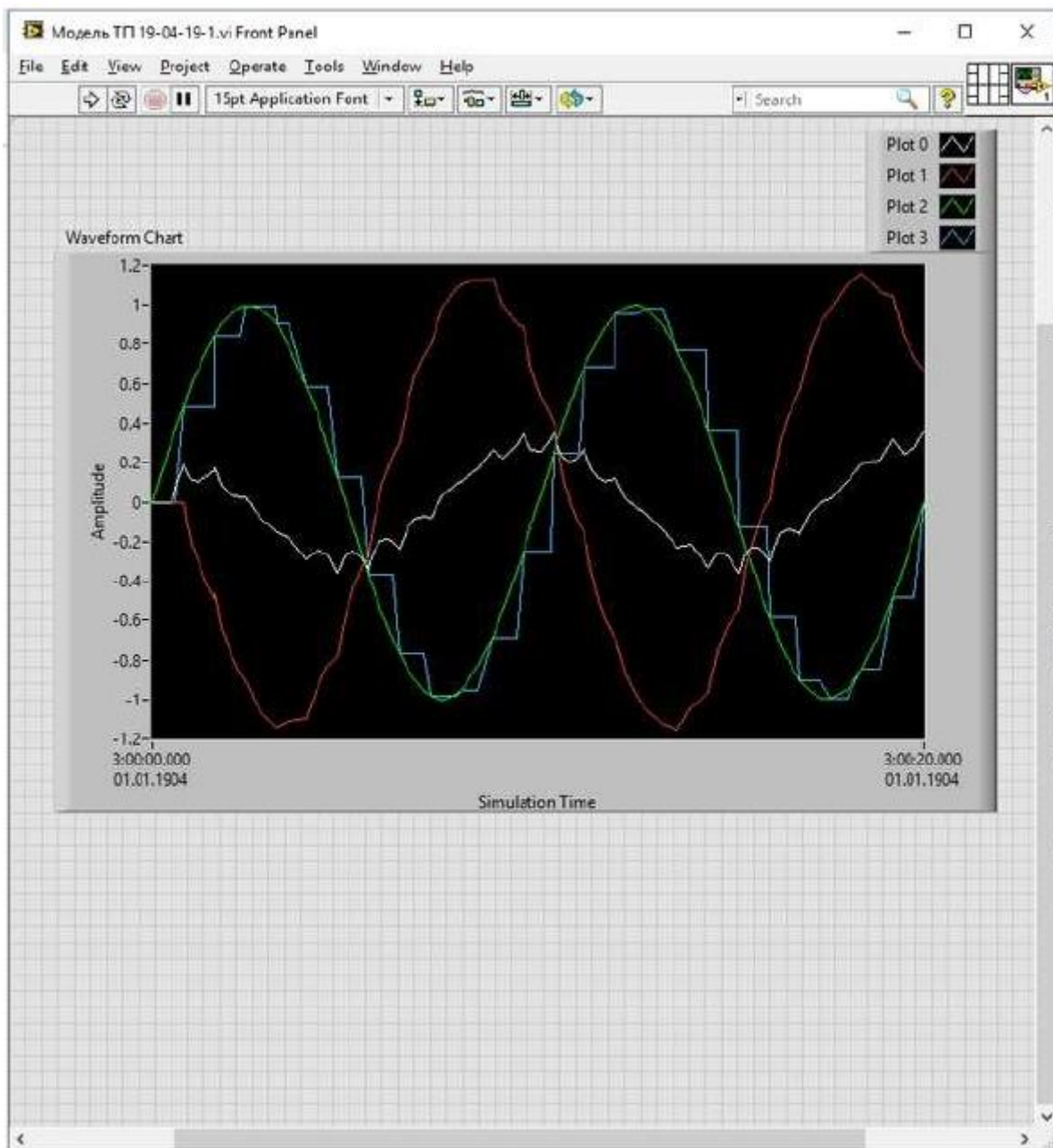


Рисунок 2.8 Система автоматизована процесу, що відповідає за дозування лігніну під час виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини

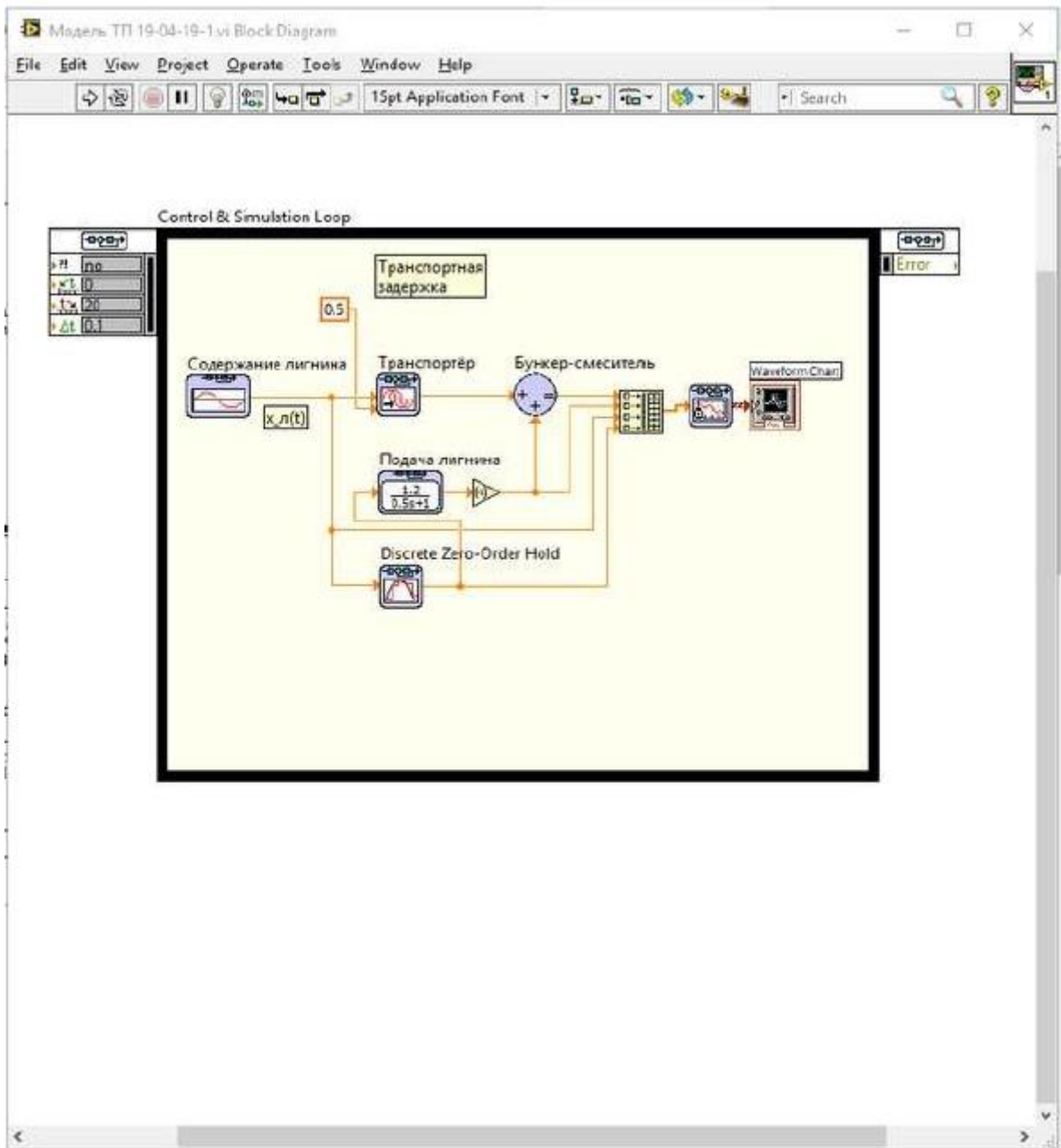


Рисунок 2.9 Система автоматизована процесу, що відповідає за дозування лігніну під час виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини

На рис. 12.1 показано зеленою лінією коливання кількості лігніну в оригіналі сировини, червоний – кількість доданого лігніну; біла лінія – зміст лігніну в отриманій суміші.

Під час дослідів було встановлено, що для отримання високої якості в пелетах має бути кількість лігніну діапазон 25...30%, тобто є необхідним

відбирають проби з такими інтервалами, щоб вміст лігніну в подрібненій суміші регулювався і його кількість не перевищувала цей інтервал.

Подрібнена в подрібнювачі деревини деревина, уражена гниллю, потрапляє в бункер попереднього зберігання, утворюючи певні шари, що відрізняються вмістом лігніну. Тоді тріска потрапляє у шнек, де він довільно змішується тричі, наприклад, ділянки довжиною L_1 і L_2 . В результаті розклад для рис. 13 стає більш гладким виглядом.

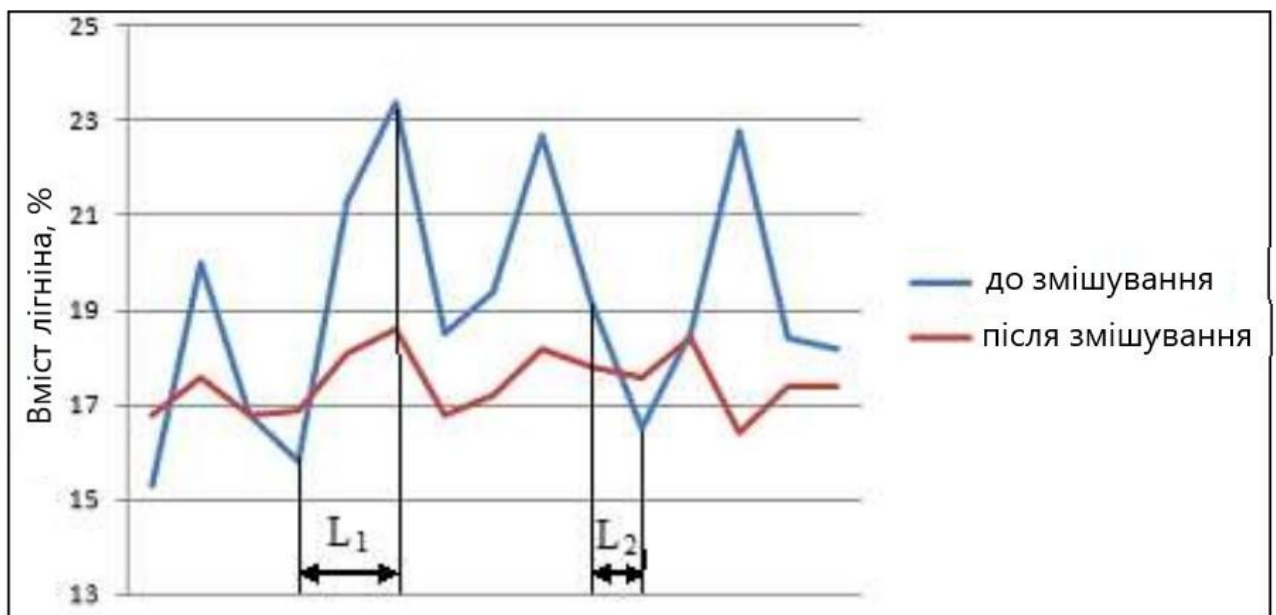


Рисунок 2.10 Кількість лігніну в трісці ураженою гниллю деревини до і після змішування шнеком

З метою забезпечення необхідної вологості подрібненої суміші частота часу взяття проб у постраждалої деревини, гниття сировини не більше 1 хв. Така періодичність дає можливість регулювати вміст лігніну в подрібненій суміші таким чином, щоб його кількість не змінювалася виходячи за межі цього діапазону.

Висновок до розділу

Розроблено техніко-технологічні рішення та математичну модель технологічного процесу, спрямовані на створення необхідного складу суміші

гниття деревини та технічного лігніну та підвищення ефективності виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини.

Загальна структура моделі що є математично-розрахунковою для виробничо-технологічного процесу пелет із гнилої деревної сировини дозволяє встановити якісну та кількісну залежність між характеристиками деревної сировини (ступінь ураження гниллю), конструктивно-технологічні параметри використовуваних технічних засобів і показник якості вироблених пелет.

Створено модель ділянки асортименту, що надходить у технологічний процес виробництва пелет, кількісно характеризує ступінь ураження деревної сировини гниллю і відображає просторову нерівномірність ступеня ураження гниллю. Комплект даних, що містяться в описаній моделі, достатньо для подальшого моделювання щоб створити кількісну залежність між характеристиками заявника для переробки деревної сировини та показниками якості вироблених пелет.

Автоматизована система управління дозволить створити необхідний склад суміші деревини, ураженої гниллю і технічним лігніном, і підвищить ефективність виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини.

Автоматизоване керування процесом дозування гниття сировини та лігніну дозволяє регулювати вміст лігніну в подрібненій суміші, знаходиться в межах допустимих значень.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ

Оскільки кава є одним з найбільш споживаних напоїв у всьому світі, відпрацьована кавова гуща (ВКГ) утворюється регулярно і збільшилася з 8,8 млн. тонн у 2019 році до 9,3 млн. тонн у 2023 році, створюючи значні проблеми із забрудненням довкілля [18,19].

Серед цих твердих відходів половина (~50%) вивозиться безпосередньо на полігони без подальшої утилізації [11,20]. Таким чином, при належному управлінні відходами, ці 4,40 - 4,65 млн. тонн можуть бути відновлені і використані як цінна сировина для різних застосувань. Завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям ВКГ, таким як багатий на жирні кислоти, амінокислоти, лігнін, полісахариди, флавоноїдами [21-23], ВКГ успішно використовується у виробництві біодизельного палива [24,25], антибактеріальних пристроях [26], літій-іонних акумуляторах [27], біопаливі [28,29], адсорбентах [30-32] та виробництвах тонкої хімії [33]. З огляду на існуючі проблеми з харчовими відходами, пов'язані з ВКГ, використання ВКГ як сировини для виробництва твердого біопалива є привабливим способом зменшення утворення відходів шляхом валоризації, а також отримання потенційних продуктів для енергетичного сектору.

Незважаючи на можливість використання в прямому згорянні, використання ВКГ показало високі викиди CO_2 у розмірі 0,54 г CO_2 / г вихідного матеріалу при низьких калорійних значеннях (15-22 МДж/кг), що є небажаними характеристиками [34,35]. Викиди небажаного CO_2 можна зменшити за допомогою поліпшення паливних властивостей за допомогою високотемпературної технології вуглецевих паливних елементів [18] або технікою спільного згорання/спільного піролізу [36]. Однак це призведе до додаткових витрат на обробку, що спричиняють підвищення вартості кінцевої продукції. На даний момент численні дослідження спрямовані на використання ВКГ як вихідного матеріалу для виробництва біо-олії або біо-газу за допомогою низькотемпературної піролізу [35], швидкотемпературного

піролізу [37,38] та каталітичного піролізу [39]. До цього часу дослідження щодо перетворення ВКГ на потенційні тверді біопалива є обмеженими в сучасній літературі [20,29]. У дослідженні повільного піролізу ВКГ було отримано біовугілля з високими калорійними значеннями за фіксованою швидкістю нагріву. Однак це дослідження не включало параметричної взаємодії основних факторів, таких як час піролізу, швидкість нагріву, рівень азоту (N_2), крім температури піролізу. В іншому дослідженні вивчено ефективність піролізу витрачених кавових ґрунтів з результатами від 77 до 85% при швидкостях нагріву 10 і 60 °C/хв відповідно [29]. Однак обидва дослідження не продовжували досліджувати кінетику згорання. Таким чином, згорання біовугілля не було оцінено в сучасній літературі, що є важливим аспектом для збільшення спалювальних установок.

У цьому дослідженні використовується підхід до оптимізації технологічного процесу отримання твердого біопалива шляхом повільного піролізу з точки зору виходу біовугілля (ВБ, %) і виходу енергії (ВЕ, %) на основі відповіді поверхневої методології моделі центрального композитного дизайну (МПРЦКД). ВБ забезпечує критичні значення виходу біовугілля; в той час як ВЕ враховує вищі теплотворні властивості (ВТВ) щодо масового виходу біовугілля. Ці відповіді (ВБ та ВЕ) також вибрано через їх миттєве вимірювання та менш дорогі вимірювання крім забезпечення реалістичних і точних вимірювань твердого тіла продуктивність біопалива порівняно з іншими вимірними властивостями в результаті остаточного та приблизного аналізу у виробничому секторі [12].

Після цього оптимізоване тверде біопаливо буде оцінено його фізико-хімічні властивості за допомогою характеристик і досліджено його кінетичні властивості та властивості горіння за допомогою термогравіметричних (ТГМ) досліджень. Щодо кінетичних досліджень прийнято ТГМ в оцінці завдяки своїй надійності, яку можна застосувати в будь-яких інертних або окислювальних умовах [40,41]. Оскільки ця дослідницька робота слідує за системним інженерним підходом, загальне виконання експерименту стало

більш економічно ефективним і менш трудомістким, ніж звичайний експериментальний підхід для отримання оптимізованої твердої речовини біопалива з ВКГ, у якому цей метод може мати велике значення в галузевій практиці, а також дослідницьких академічних колах.

3.1. Препарат ВКГ-біовугілля

В дослідження було використано відходи кавової гущі *Coffea Arabica*. Отримані відходи сушилися в печі при 60 °С до постійної маси, щоб уникнути природного розкладу і росту плісняви, і зберігалися в герметичній пляшці для подальших досліджень. Для експерименту з повільним піролізом відома кількість ВКГ була поміщена в алюмінієвий човник і розміщена в центрі кварцевої трубчастої реакційної системи (внутрішній діаметр: 0,06 м і довжина: 0,8 м), встановленої в трубчастій пічі (МТІ ОТФ-1200Х) для ефективного термічного впливу. Перед початком експерименту через реактор протягом 15 хвилин при температурі навколишнього середовища пропускатися 100 мл/хв азоту (N_2), щоб забезпечити безкисневу атмосферу. Після піролізування утворені продукти були названі ВКГ-біовугілля, і їх виходи біовугілля (ВБ, %) обчислювалися на основі різниці мас. Теплота згоряння у вищих опалювальних значеннях ВКГ та ВКГ- біовугілля визначалися за допомогою бомбового калориметра (Parr). Енергетичний вихід (ВЕ, %) ВКГ- біовугілля обчислювався за такою формулою [42,43]:

$$\text{Вихід енергії (ВЕ)} = \frac{m_F}{m_0} \cdot \frac{HHV_{\text{Біовугілля}}}{HHV_{\text{Біомаса}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де m_0 і m_F представляють початкову і кінцеву вагу відповідно і $HHV_{\text{Біовугілля}}$ і $HHV_{\text{Біомаса}}$ представляють значення HHV ВКГ-біовугілля і значення HHV необробленої ВКГ відповідно.

Були дві експериментальні відповіді (ВБ та ВЕ), для кожного біовугілля виміряно відповідно до п'яти рівнів випадкових експериментальних точок на основі значення альфа ($\alpha_{\text{CCD}} = 2$) моделі методології поверхневого результату центрального композитного дизайну, створеної Design Expert® версії 7

(таблиця 1) [44,45]. Значення α_{CCD} , що використовується в цьому, являє собою ортогональну модель, що обертається [10]. Діапазон змінних був обраний на основі літератури, а також попередніх експериментів. За низького часу та температури піролізу процес піролізу буде неповним. В іншому випадку занадто високий час і температура піролізу зменшать вихід продукту. При повільному піролізі швидкість нагрівання $<20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{хв}^{-1}$ вважається повільним піролізом, тоді як вище цього значення процес вважається швидким піролізом.

На основі нашого попереднього тестування з кварцовою трубкою, швидкість потоку N_2 з $<100 \text{ мл} \cdot \text{хв}^{-1}$ потребує більше часу, щоб витіснити повітря з трубки, тоді як при швидкості потоку вище $300 \text{ мл} \cdot \text{хв}^{-1}$ продукт буде виноситися з реактора замість того, щоб залишатися на зразку.

Таблиця 3.1 Експериментальні змінні повільного піролізу та їх кодовані рівні

Змінна	Одиниця вимірювання	Код	Рівень				
			-2	-1	0	+1	+2
Температура піролізу	$^\circ\text{C}$	A	400	500	600	700	800
Час піролізу	хв	B	10	30	50	70	90
Швидкість нагріву	$^\circ\text{C}/\text{хв}$	C	3	6	9	12	15
Швидкість потоку азоту	мл/хв	D	100	150	200	250	300

Використовуючи дані в моделях, два поліноми можна отримати за допомогою такого математичного виразу:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

де Y вказує на прогнозовану відповідь, β представляє регресію константи коефіцієнта, X_i та X_j є вхідними параметрами, а ε представляє випадкову похибку, тоді як k , 0 , i та j є математичними виразами, що представляють кількість параметрів, константу перетину, лінійну константу та квадратичну константу відповідно.

3.2. Дослідження характеристик ВКГ та оптимізованого ВКГ-біовугілля

Вміст лігноцелюлози в ВКГ визначали на основі наступних процедур [40,46]. Близько 1 г ВКГ кип'ятили із зворотним холодильником безперервно протягом 6 годин при 60 °С з ацетоном як розчинником за допомогою Soxhlet екстрактором і сушать як біомасу без екстрактів. Оцінюють вміст геміцелюлози в ВКГ, близько 0,3 г безекстрактивних ВКГ з 0,5 моль L⁻¹ 100 мл NaOH протягом 3,5 годин при 80 °С з подальшим промиванням до рН=7 і сушінням до постійного рівня ваги. Різниця ваги представлятиме різницю маси геміцелюлози. Для визначення ділення лігніну використовують близько 0,3 г безекстрактивних речовин ВКГ спершу з 3 мл 72 мас.% H₂SO₄ при 100 об/хв і 30 °С протягом 2 год. Потім суміш розбавляють перед гідролізуванням при температурі кипіння протягом 4 годин, потім дистильованою водою промивають до рН=7 і висушують до постійної ваги.

Зміни морфології поверхні та елементних характеристик ВКГ та ВКГ - біовугілля досліджено за допомогою полеемісійного скануючого електронного мікроскопа (ПСЕМ), який оснащений енергодисперсійною рентгенівською спектрометрією (ZEISS Sigma). Зображення зразка були зроблені при різному збільшенні (150–1000 разів). Поверхневі хімічні функції ВКГ і ВКГ-біовугілля були визначені за допомогою інфрачервоного спектроскопа з перетворенням Фур'є (PerkinElmer) шляхом запису спектрів у діапазоні хвильових чисел 400–4000 см⁻¹ з роздільною здатністю 1 см⁻¹. Порошкову рентгенівську дифракцію (PANalytical) проводили з випромінюванням *Cu Ka* ($\lambda = 0,15418$ нм) як на ВКГ, так і на ВКГ-біовугілля при 40 мА і 40 кВ і в 2 θ діапазоні 20 і 70 °. ТГМ (Mettler Toledo) використовувався для виконання приблизного аналізу ВКГ та ВКГ-біовугілля відповідно до методу [40]. Приблизно 15 мг зразка поміщали в мікротигель і піддавали нагріванню зі швидкістю 5 °С хв⁻¹ в аналітичній камері від 30 °С до 110 °С з безперервним потоком азоту при 50 мл/хв і підтримували протягом 15 хв, потім нагрівають до 800 °С і витримують 10 хв. Потім газ перемикали

на O_2 зі швидкістю потоку 50 мл/хв для процесу спалювання з наступним нагріванням до $900\text{ }^\circ\text{C}$ і витримкою протягом 30 хв.

Враховуючи попередні дані, фактична температура горіння складає:

$$T_D = \frac{Q_O + Q_H^P \eta_{TD} - q - q_d}{\Sigma V c_T} \quad (3.3)$$

де Q_O – фізична величина як кількість параметру теплота, що є питомою, яка наявна в навколишньому повітрі та в розглянутому паливі, кДж/кг;

Q_H^P - фізична величина як нижня кількість параметру теплота, що є питомою, характеризує спалювання палива, кДж/кг;

η_{TD} – ККД двигуна (топки);

q – фізична величина кількості параметру теплота, що є питомою та віддається при нагрівання поверхням нагріву, яке приходить на одинцю маси палива, кДж/кг;

q_d – фізична величина кількості параметру теплота, що витрачається на реакцію дисоціації продуктів що утворюються під час горіння, кДж/кг;

V_T – величина відображаюча параметр об'єму для продуктів, що є компонентами для горіння, $\text{м}^3/\text{кг}$;

c_T – коефіцієнт, що характеризує калометричну горіння параметр температура та відображає компоненти об'ємності ємності теплової горіння, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$.

$$T_D = \frac{38,6 + 53,8 \cdot 20,8 - 1,4 - 0,6}{2,1 + 1,0 + 1,1} = 275,2\text{ }^\circ\text{C}$$

Приблизні дані ТГМ можна використовувати для отримання значення вологості, вмісту летких речовин, вмісту фіксованого вуглецю та вмісту золи. Паливне співвідношення зразка було розраховано на основі співвідношення фіксованого вуглецю до летких речовин [47]. Остаточний аналіз проводився за допомогою елементного аналізатора (PerkinElmer, США) для визначення вмісту вуглецю (C), водню (H), азоту (N), сірки (S), кисню (O) як у ВКГ, так і

в ВКГ-біопаливі, відповідно, і виражено у відсотках (мас.%). Усі дослідження повторювали принаймні двічі.

3.3 Розробка моделі. Генерація моделі та статистичний аналіз

Параметричні взаємодії, а також їх сумісний вплив на різні результати, досліджували шляхом варіювання таких параметрів повільного піролізу, як А (температура піролізу), В (час піролізу), С (швидкість нагрівання) і D (швидкість потоку інертного газу) на двох незалежних зразках, вихід біовугілля (ВБ, %) та вихід енергії (ВЕ, %). Як підсумовано в таблиці 2, обидві виміряні відповіді добре узгоджувалися зі значеннями, передбаченими відповідною моделлю.

Таблиця 3.2 Виміряні та прогнозовані реакції ВБ та ВЕ на основі .

№	А	В	С	D	Фактичний	Розрахунковий	Фактичний	Розрахунковий
					ВБ	ВБ	ВЕ	ВЕ
1	800,00	50,00	9,00	200,00	37,60	30,08	44,41	50,47
2	600,00	90,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
3	700,00	30,00	6,00	250,00	41,13	32,90	48,58	55,20
4	700,00	70,00	6,00	250,00	41,13	32,90	48,58	55,20
5	600,00	50,00	15,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
6	500,00	30,00	12,00	250,00	29,38	23,50	34,70	39,43
7	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
8	500,00	70,00	12,00	250,00	29,38	23,50	34,70	39,43
9	500,00	30,00	12,00	150,00	17,63	14,10	20,82	23,66
10	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
11	700,00	70,00	6,00	150,00	24,68	19,74	29,15	33,12
12	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
13	400,00	50,00	9,00	200,00	18,80	15,04	22,21	25,24
14	700,00	30,00	12,00	150,00	24,68	19,74	29,15	33,12
15	600,00	50,00	9,00	300,00	42,30	33,84	49,97	56,78
16	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
17	500,00	70,00	6,00	150,00	17,63	14,10	20,82	23,66
18	700,00	70,00	12,00	250,00	41,13	32,90	48,58	55,20
19	700,00	70,00	12,00	150,00	24,68	19,74	29,15	33,12
20	500,00	70,00	12,00	150,00	17,63	14,10	20,82	23,66
21	700,00	30,00	12,00	250,00	41,13	32,90	48,58	55,20
22	600,00	10,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
23	600,00	50,00	9,00	100,00	14,10	11,28	16,66	18,93
24	500,00	30,00	6,00	250,00	29,38	23,50	34,70	39,43
25	600,00	50,00	3,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85

26	500,00	30,00	6,00	150,00	17,63	14,10	20,82	23,66
27	700,00	30,00	6,00	150,00	24,68	19,74	29,15	33,12
28	500,00	70,00	6,00	250,00	29,38	23,50	34,70	39,43
29	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85
30	600,00	50,00	9,00	200,00	28,20	22,56	33,31	37,85

Завдяки моделюванню вхідних і вихідних даних результатів було згенеровано чотири квадратичні моделі на основі ВБ і ВЕ, відповідно, у розрахункових і фактичних змінних:

$$VB(\%) = +27,45 - 1,56A - 0,31B - 0,53C + 0,47A^2 \text{ (Розрахунковий)} \quad (3.4)$$

$$VB(\%) = +56,08 - 0,072A - 0,015B - 0,177C + (4,70D - 0,05)A^2 \text{ (Фактичний)} \quad (3.5)$$

$$VE(\%) = +37,34 - 2,61A - 0,60B - 0,80C + 0,69A^2 \text{ (Розрахунковий)} \quad (3.6)$$

$$VE(\%) = +81,86 - 0,11A - 0,03B - 0,27C + (6,94D - 0,05)A^2 \text{ (Фактичний)} \quad (3.7)$$

На основі рівнянь моделі (рівняння (3.4) – (3.7)) та інтерактивних графіків (рис. 1 і рис. 2) виявлено, що такі параметри піролізу, як А, В і С, мають значний вплив на значення ВБ і ВЕ. Наприклад, А, В і С мають негативний вплив як на ВБ, так і на ВЕ, тоді як А² має позитивний вплив. Таким чином, для цього конкретного дослідження D (вплив потоку газоподібного азоту) не має очевидного впливу як на ВБ, так і на ВЕ.

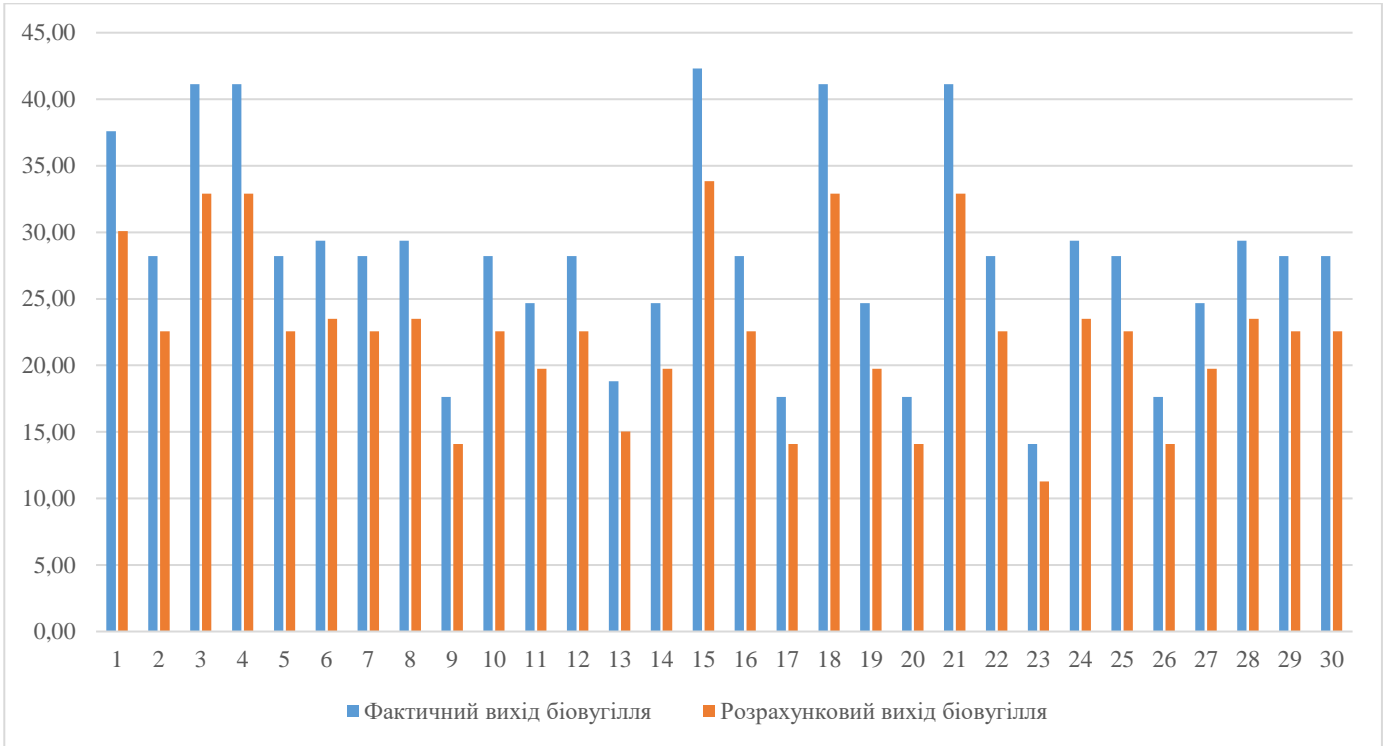


Рисунок 3.1 Графік результатів поверхні моделі ВВ.

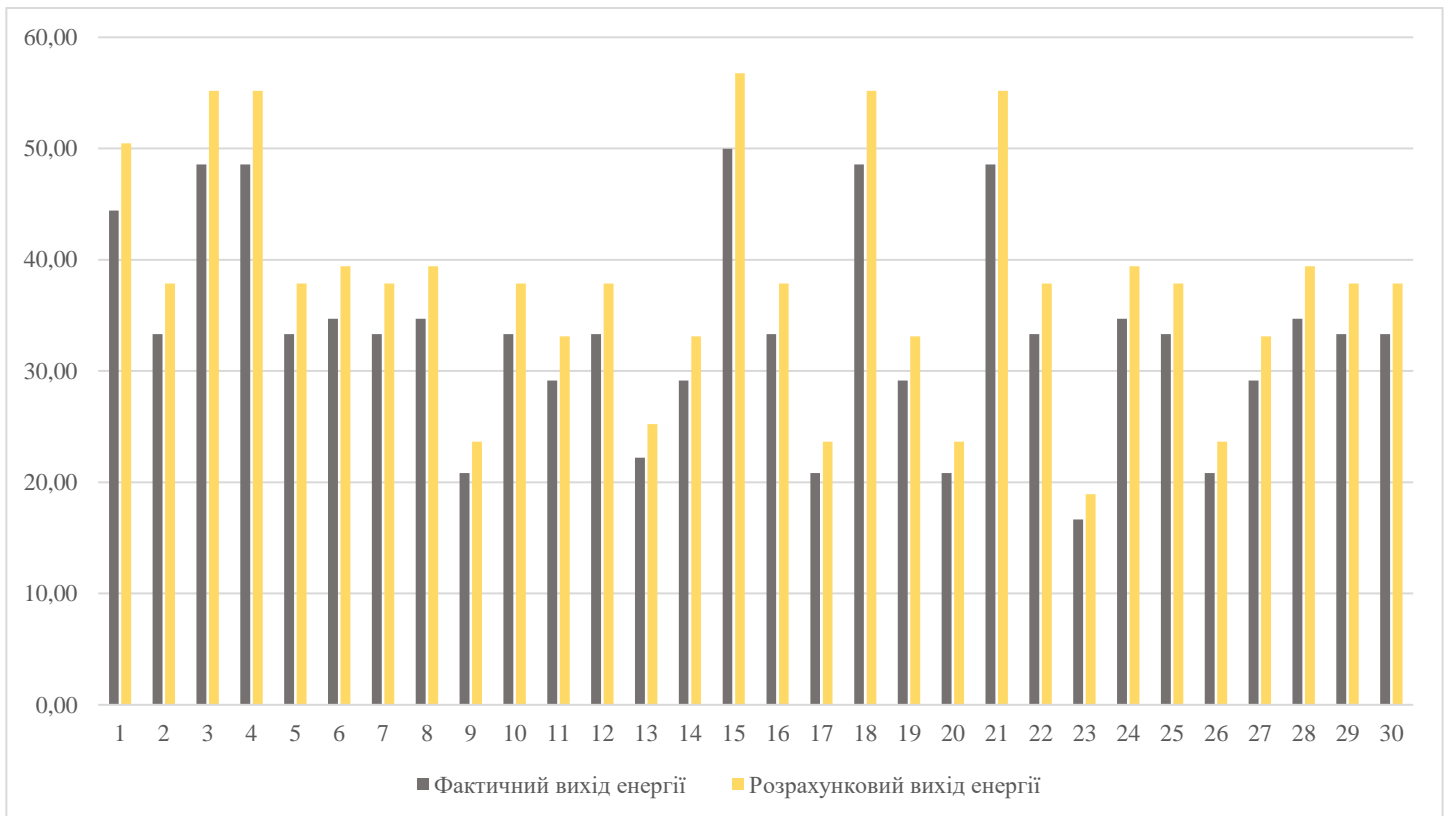


Рисунок 3.2 Графік результатів поверхні моделі ВЕ.

3.4 Характеристика ВКГ та оптимізованого ВКГ-біовугілля. Лігноцелюлозний тест, морфологія поверхні та аналіз енергодисперсійного рентгенівського випромінювання

На підставі лігноцелюлозного тесту (табл. 3) було виявлено, що вміст геміцелюлози, целюлози та лігніну можна порівняти з іншими дослідженнями [46,54]. Сприятливою ознакою є високий вміст лігніну в СК (34,94%) для синтезу біовугілля [40].

Базуючись на таблиці 3, аналіз ЕДРВ орієнтовно показує, що зміни елементів були досить суттєвими до та після піролізу. Як спостерігалось, вміст елемента С значно збільшився з 56,25% до 78,82%, тоді як елемент О зменшився з 29,75% до 10,59%. Інші елементи залишилися стабільними з невеликими змінами після процесу піролізу. Таким чином, результати ЕДРВ показують, що процес піролізу накладає більше впливу на ВКГ- біовугілля хімічно, ніж на його фізичні властивості.

Для визначення теплотворної здатності (калорійності) відпрацьованої кавової гущі, застосували таку формулу:

$$T = \frac{Q}{M} \quad (3.8)$$

де T – теплотворна здатність, Дж/кг; Q – енергія, виділена при спалюванні, Дж; M – маса зразка, кг.

Під час проведення експерименту, перероблену відпрацьовану кавову гущу, у вигляді твердого біопалива, масою 0,845 кг було спалено, в результаті чого отримано 2586 Дж теплової енергії.

$$T = \frac{2586,3}{0,845} = 3\,060,71 \text{ Дж/кг}$$

Таким чином, в результаті спалювання 0,845 кг кавового біовугілля, теплотворна здатність становить 3060,71 Дж/кг.

Таблиця 3.3 Фізико-хімічні характеристики ВКГ та оптимізованого ВКГ-біовугілля.

Ваговий відсоток (%)	ВКГ	Оптимізоване ВКГ-біовугілля
Хімічний склад		
Геміцелюлоза	48,52	-
Целюлоза	17,08	-
Лігнін	35,24	-
Екстрактивні речовини	19,72	-
EDX аналіз (%)		
C	56,55	79,12
N	9,64	5,00
O	30,05	10,89
Mg	1,25	1,53
P	1,80	0,99
S	0,77	0,54
K	1,26	2,18
Ca	1,09	4,06
Приблизний аналіз (%)		
Вологомісткість	5,01	2,96

Летючі речовини	76,77	12,58
Фіксований вуглець	17,11	83,13
Зольність	2,31	2,52
Коефіцієнт палива	0,52	7,05
Летючі речовини/фіксований вуглець	4,85	0,45
ННВ (МДж/кг)	22,89	31,71
Вихід біовугілля (%)	-	30,24
Вихід енергії (%)	-	41,90
Остаточний аналіз (%)		
С	47,93	80,65
Н	6,87	3,29
О	46,10	12,73
Н	3,23	4,54
S	-	-
Н/С атомне співвідношення	1,95	0,74
О/С атомне співвідношення	0,98	0,42

3.5 Приблизний і остаточний аналізи

Приблизні результати ВКГ та оптимізованого ВКГ-біовугілля представлені в таблиці 6. З порівняльної характеристики, вміст вологи в оптимізованому ВКГ-біовугіллі зменшено з 4,71% до 2,66%. Найбільш очевидна зміна в оптимізованому ВКГ-біовугіллі була в підвищенні вмісту фіксованого вуглецю від 16,81% до 82,83%. Цей результат приблизного аналізу узгоджувався з результатом кінцевого аналізу, вміст С (47,73%) було збільшено до 80,35% після процесу піролізу. Вміст летких речовин в оптимізованому ВКГ-біовугіллі був низьким (12,28%) в основному через процес випаровування під час піролізу. Виходячи з вмісту золи, ВКГ і оптимізоване ВКГ-біовугілля були приблизно однаковими (~2%), завдяки чому їх можна було використовувати як сировину для спалювання, не викликаючи проблем із шлаком. Однак, як згадувалося раніше, пряме використання ВКГ як паливних матеріалів було бажаним через його низький вміст енергії, що може бути пов'язано з низьким вмістом вуглецю. Під час

остаточного аналізу було також виявлено, що O зменшився з 45,80% до 12,43%, відповідно до ЕДРВ аналізу (з 29,75% до 10,59%).

3.6 Оцінка вартості

З оптимізованими параметрами повільного піролізу ($A = 500$ °C, $B = 30$ хв, $C = 10$ °C/хв, $D = 150$ мл/хв) разом із ВБ (29,94%) та ВЕ (41,60%), витрати на виробництво ВКГ-біовугілля з лабораторії можна оцінити, що значно сприяє комерціалізації. Таблиця 4 підсумовує розбивку витрат для кожного пункту, а також їх обґрунтування та припущення.

Як видно з таблиці 10, оскільки ВКГ збиралися безпосередньо як харчові відходи і використовувалися без миття, подрібнення та просіювання, витрати на виробництво ВКГ-біовугілля значно зменшилися завдяки виключенню такої стадії обробки. Щоб досягти постійної сухої маси ВКГ, було потрібно 36 годин сушіння; однак у реальній промисловості на практиці можна застосувати більш потужний метод сушіння, щоб значно скоротити час сушіння, що згодом зменшить вартість сушіння. В умовах масового виробництва також може бути можливий прямий піроліз ВКГ за умови, що початковий вміст вологи в них не надто високий. На другому місці за вартістю був процес піролізу; однак, оскільки параметри повільного піролізу були оптимізовані, вартість піролізу була досить економічною. Виходячи із загальної оцінки витрат, вартість виробництва 1 кг біовугілля ВКГ становила близько 32,14 грн за 1 кг, що можна вважати цілком досяжним. Загальна вартість продукції може бути додатково знижена в промислових масштабах.

Таблиця 3.4 Витрати на виробництво 1 кг ВКГ-біовугілля

Процес/матеріал	Тривалість (год)	Номінальна потужність (кВт)	Вартість одиниці (грн)	Загальна вартість (грн)	Примітки
Вартість сировини	-	-	0,00	0,00	ВКГ збирали безпосередньо з кафе

Вартість промивання	-	-	-	0,00	Промивання не застосовувалося
Вартість сушіння	36	0,05	4,32	7,78	Лабараторне сушіння
Вартість подрібнення	-	-	-		Без потреби в подрібненні
Вартість просіювання	-	-	-		Без потреби в просіюванні
Вартість піролізу	1,15	0,30	4,32	1,49	Включає час нагрівання та час витримки
Вартість N ₂ (м3)	174,19 хв	-	15	0,36	Включає препіроліз, піроліз та постпіроліз
Накладні витрати	-	-	0,00		Припускається 10% усіх витрат
Кінцева вартість			-	9,62	Для виробництва 0,299 кг на кожен кг
Кінцева вартість (1/кг)				32,14	Для виготовлення основи 1 кг

Висновок до розділу

Успішно проведено оптимізацію процесу ВКГ-біопалива з використанням , в яких такі параметри, як температура піролізу (А), час піролізу (В), швидкість нагріву (С). Ці дані виступали ключовими факторами для моделей ВВ і ВЕ. Обидві моделі були підтверджені випадковими тестами з чудовою відповідністю експериментальних даних. ВКГ-біовугілля продемонструвало сприятливі паливні характеристики, такі як високий вміст фіксованого вуглецю (82,83%), низький вміст летючих речовин (12,28%) і низька зольність (2,22%). Виходячи з кінетики горіння. Крім того, характеристики згорання ВКГ-біовугілля були формою стабільного горіння, відповідного генеруванню енергії. Вартість ВКГ-біовугілля також виявилася конкурентоспроможною за ціною 32,14 грн за кг. Загалом, розроблене біопаливо продемонструвало великий потенціал у застосуванні в енергетиці завдяки високому виходу біовугілля та енергії з бажаним співвідношенням палива та характеристиками, а також економічною ефективністю.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

На сучасних виробництвах, де використовується кавова гуща для виробництва біопалива, особливо враховують аспекти, що забезпечують охорону праці. Охорона праці є ключовим аспектом у забезпеченні безпечних умов праці для всіх працівників, а також у попередженні травматичних ситуацій та забезпеченні стабільності виробничих процесів.

4.1 Загальні принципи охорони праці на виробництві

На виробництві, де проводяться роботи з кавовою гущею, дотримання наступних загальних принципів охорони праці є обов'язковими.

Ідентифікувати потенційні небезпеки – перед початком робіт необхідно провести аналіз ризиків і визначити потенційні небезпечні чинники, пов'язані з роботою з кавовою гущею. Оцінити ризики на ефективно ними керувати під час виробничого процесу. Розробка і впровадження ефективних стратегій для зменшення ризиків травматизму та інших негативних наслідків для здоров'я працівників. Використання захисного обладнання – забезпечення працівників відповідним захисним обладнанням (маски, респіратори, рукавички тощо) для запобігання впливу пилу кавової гущі на органи дихання та шкіри.

Контроль рівня пилу – системи вентиляції та очистки повітря для зменшення концентрації пилу кавової гущі в робочій зоні.

Проведення систематичних інструктажів з охорони праці для всіх працівників, які займаються обробкою кавової гущі. Також необхідно забезпечити регулярний медичний контроль за станом здоров'я працівників, що займаються роботами з кавовою гущею.

4.2 Екологічні аспекти

Поміж основними заходами охорони праці на виробництві також включаються утилізація відходів та мінімізація енергетичного споживання. Забезпечення відповідної утилізації залишків кавової гущі дозволяє зменшити

негативний вплив на навколишнє середовище. Використання енергоефективних технологій та процесів для зменшення енергоспоживання під час переробки кавової гущі сприяє економічності функціонування підприємства.

Охорона праці на виробництві кавової гущі є невід'ємною частиною усіх виробничих процесів компаній, які займаються цією сировиною. Дотримання високих стандартів охорони праці сприяє не тільки забезпеченню безпеки працівників, але і досягненню сталого розвитку у галузі використання біопалива.

Охорона праці на підприємствах в Україні регулюється рядом законодавчих актів. Кодекс, в якому описані права громадян праці та працевлаштування в Україні, забезпечує принципи та норми що є загальними та стосуються охорони праці, умов праці та соціального захисту працівників.

Стосовно охорони праці існує основний закон, який є визначеним для правових засад та організаційних норм охорони праці на всіх підприємствах незалежно від форм власності. Постанови Кабінету Міністрів України регламентують урядові постанови, які встановлюють конкретні нормативи, правила та стандарти з охорони праці для різних галузей та видів робіт. Нормативні акти стосовно української соціальної політики включають накази, інструкції, методичні рекомендації щодо забезпечення безпеки та охорони здоров'я працівників. Також розроблені та впроваджені внутрішні правила та інструкції з охорони праці, розроблені керівництвом підприємства з урахуванням специфіки виробничих процесів та умов праці.

Висновок до розділу

Закони та нормативні акти спільно забезпечують систему правового регулювання охорони праці в Україні, спрямовану на забезпечення безпеки, здоров'я та соціального захисту працівників на робочих місцях.

5 ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД ВАРТОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ З ВІДХОДІВ КАВОВОЇ ГУЩІ

При детальному розрахунку витрат на виробництво тепла потрібно враховувати такі параметри:

- інвестиційні витрати на всі елементи процесу виробництва тепла, а також на їх будівництво і установку.
- властивості сировини: витрати, вміст води та об'ємна щільність.
- ціна на електроенергію: електричне навантаження для всіх установок та коефіцієнт одночасності, що враховує, що не всі електричні установки працюють з максимальною потужністю одночасно.
- процентна ставка.
- доступність обладнання.
- витрати на персонал.
- інші витрати.

На основі цих даних можна розрахувати як загальні витрати на виробництво тепла, так і витрати, що пов'язані з кожним елементом або фактором процесу виробництва.

1) Загальні Умови

Відповідно, термін експлуатації та витрати на обслуговування для будівництва становлять 50 років і 0,50% від інвестиційних витрат на рік відповідно. Для установки ці терміни складають 10 років та 1,00% від інвестиційних витрат на рік, а для котла – 10 років та 2,00% від інвестиційних витрат на рік.

Вплив загальних інвестицій на витрати на виробництво тепла відносно невеликий, але зменшити загальні інвестиційні витрати можна за рахунок використання існуючої інфраструктури, тоді як будівництво нової інфраструктури пов'язане з високими витратами.

2) Витрати на капітал

Витрати на капітал для економічної оцінки включають інвестиції в будівництво, установку та підсистеми котлів. Для розрахунку середньої ціни котельних систем залежно від пального були проведені консультації з кількома українськими виробниками [9, 15, 20].

3) Витрати на споживання

Витрати на споживання включають витрати на паливо та електроенергію.

Ціна на електроенергію в Україні залежить від річного споживання електроенергії та встановленої потужності споживача; враховано середню ціну електроенергії за період 2021-2023 років [17-19].

Для розрахунку витрат на споживання пального враховано середню ціну та ефективність кожної окремої системи опалення [1, 9, 15, 20].

4) Витрати на експлуатацію та інші витрати

До витрат на експлуатацію відносяться обслуговування, витрати на персонал та контракти [15].

До інших витрат включаються страхові внески, загальні збори, податки та адміністративні витрати. Ці витрати враховуються в обсязі 0,50% від загальних інвестиційних витрат на рік.

Для порівняльної характеристики було взято три види котлів (котел на біомасі, газовий/рідинний котел, твердопаливний котел). Для підрахунку теплоутворення та витрат на забезпечення процесу горіння було використано деревину, біопаливо з відходів кавової гущі, вугілля, дизель, природний газ.

Таблиця 5.1 Економічна оцінка енергоефективності палива

Паливо	Питома теплота згоряння палива, МДж/кг	Вартість палива, грн/кг (м3)	Собівартість палива, грн/МДж
Дрова	15	1000	66,67
Біовугілля з кавової гущі	18	5	0,28
Кам'яне вугілля	27	20	0,74
Дизельне паливо	43	52	1,21
Природний газ (метан)	50	31	0,62

Відповідно наведених даних, видно що фізична величина теплота, що є питомою, та характеризує згоряння паливного біовугілля з ВКГ складає 18 МДж/кг, і займає 4-е місце з розглянутого переліка палив.

Було розглянуто ринок ціноутворення обраного палива і підсумовано в таблиці 5.1 (3-тя колонка). В даній таблиці відображена середня ціна за один кілограм (метр кубічний) сировини. Відповідно до даних, видно що біовугілля з кавової гущі має найменшу собівартість.

Проаналізувавши наведені дані, була зроблена економічна оцінка собівартості до енерговиділення обраних типів палива. Дані відображено в таблиці 5.1 (4-та колонка) та на рисунку 5.1.

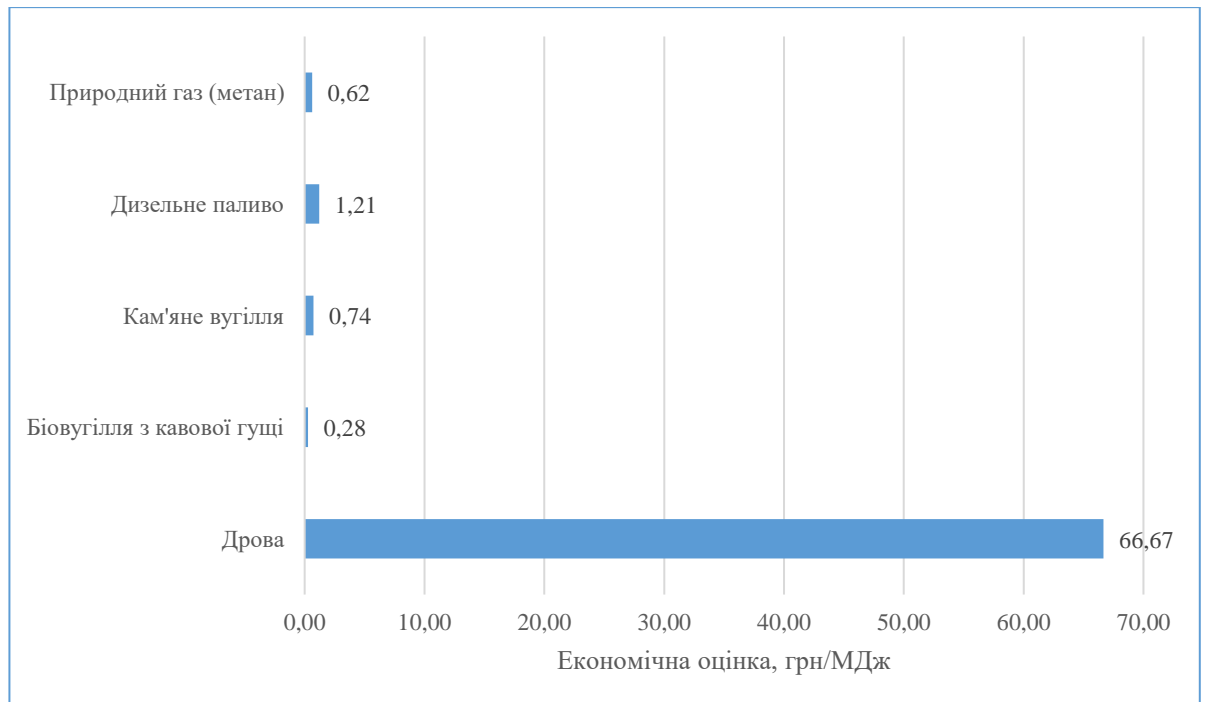


Рисунок 5.1 Економічна оцінка палива

Відповідно до економічної оцінки собівартості на 1 МДж енергії, біовугілля з кавової гущі складає найменший, тобто найдешевший, показник, з поміж досліджуваних типів палива. Слід зазначити що отриманий коефіцієнт біовугілля з кавової гущі в цілому в 2-4 рази менший від коефіцієнтів природного газу, дизельного пального, кам'яного вугілля. Дрова, як вид палива, виявились найдорожчими, з найменшою питомою

теплотою згоряння (15 МДж/кг), та дорожче в енергетичному еквіваленті від біовугілля з кавової гущі в 238 разів.

Висновок до розділу

Економічне обґрунтування використання кавової гущі в якості твердого біопалива підкріплюється її високим енергетичним потенціалом, доступністю як сировини, можливостями утилізації відходів, створенням нових продуктів і зменшенням залежності від імпорту. Це робить такий підхід привабливим для розвитку біопаливного сектору, сприяючи економічній ефективності підприємств і сприяючи сталому розвитку в цілому.

ВИСНОВКИ

Під час досліджень було оцінено витрачені кавові залишки як потенційне джерело для виробництва біодизелю та його побічних продуктів у вигляді пелет. Вилучення олії за допомогою суміші гексан/ізопропанол (50:50 об/об), що дозволило отримати більше відновлення олії (21,5%) за відносно низьку вартість, було перетворено на біодизель з виходом 82%. Аналізи GC показали, що біодизель, отриманий з витрачених кавових залишків, складався як з насичених (47,1%), так і з ненасичених (51,2%) ефірів. Якість отриманого біодизелю була оцінена відповідно до стандарту ДСТУ, що показало, що отриманий біодизель відповідає стандартним обмеженням для всіх оцінюваних параметрів за винятком вмісту залишкового вуглецю.

Тверді відходи, що залишаються після вилучення олії та гліцерину, які є побічними продуктами виробництва біодизелю, експериментально підтверджено як перспективні сировини для виробництва пелет палива (21,6 МДж/кг). Виробництво твердих відходів після вилучення олії та гліцерину пелет також може сприяти застосуванню підходу "нульового відходу" у виробництві біодизелю та уникнути витрат на утилізацію сирої гліцерину. Ця робота дозволить отримати нові уявлення про виробництво біопалив без вирощування рослин та/або перетворення їжі на паливо.

Розроблено техніко-технологічні рішення та математичну модель технологічного процесу, спрямовані на створення необхідного складу суміші гниття деревини та технічного лігніну та підвищення ефективності виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини.

Загальна структура моделі охарактеризованої математично для виробничо-технологічного процесу пелет із гнилої деревної сировини дозволяє встановити якісну та кількісну залежність між характеристиками деревної сировини (ступінь ураження гниллю), конструктивно-технологічні параметри використовуваних технічних засобів і показник якості вироблених пелет.

Створено модель ділянки асортименту, що надходить у технологічний процес виробництва пелет, кількісно характеризує ступінь ураження деревної сировини гниллю і відображає просторову нерівномірність ступеня ураження гниллю. Комплект даних, що містяться в описаній моделі, достатньо для подальшого моделювання щоб створити кількісну залежність між характеристиками заявника для переробки деревної сировини та показниками якості вироблених пелет.

Автоматизована система управління дозволить створити необхідний склад суміші деревини, ураженої гниллю і технічним лігніном, і підвищить ефективність виробництва пелет з ураженої гниллю деревної сировини.

Автоматизоване керування процесом дозування гниття сировини та лігніну дозволяє регулювати вміст лігніну в подрібненій суміші, знаходиться в межах допустимих значень.

Успішно проведено оптимізацію процесу ВКГ-біопалива з використанням, в яких такі параметри, як температура піролізу (А), час піролізу (В), швидкість нагріву (С). Ці дані виступали ключовими факторами для моделей ВВ і ВЕ. Обидві моделі були підтверджені випадковими тестами з чудовою відповідністю експериментальних даних. ВКГ-біовугілля продемонструвало сприятливі паливні характеристики, такі як високий вміст фіксованого вуглецю (82,83%), низький вміст летючих речовин (12,28%) і низька зольність (2,22%). Виходячи з кінетики горіння. Крім того, характеристики згорання ВКГ-біовугілля були формою стабільного горіння, відповідного генеруванню енергії. Вартість ВКГ-біовугілля також виявилася конкурентоспроможною за ціною 32,14 грн за кг. Загалом, розроблене біопаливо продемонструвало великий потенціал у застосуванні в енергетиці завдяки високому виходу біовугілля та енергії з бажаним співвідношенням палива та характеристиками, а також економічною ефективністю.

Закони та нормативні акти спільно забезпечують систему правового регулювання охорони праці в Україні, спрямовану на забезпечення безпеки, здоров'я та соціального захисту працівників на робочих місцях.

Економічне обґрунтування використання кавової гуші в якості твердого біопалива підкріплюється її високим енергетичним потенціалом, доступністю як сировини, можливостями утилізації відходів, створенням нових продуктів і зменшенням залежності від імпорту. Це робить такий підхід привабливим для розвитку біопаливного сектору, сприяючи економічній ефективності підприємств і сприяючи сталому розвитку в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Johnson, K.; Liu, Y.; Lu, M. A Review of Recent Advances in Spent Coffee Grounds Upcycle Technologies and Practices. *Front. Chem. Eng.* 2022, 4, 2.
2. Mussatto, S.I.; Machado, E.M.S.; Martins, S.; Teixeira, J.A. Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food Bioprocess Technol.* 2021, 4, 661–672.
3. Kondamudi, N.; Mohapatra, S.K.; Misra, M. Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *J. Agric. Food Chem.* 2018, 56, 11757–11760.
4. Taifouris, M.; Corazza, M.L.; Martín, M. Integrated Design of Biorefineries Based on Spent Coffee Grounds. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021, 60, 494–506.
5. Johnson, K.; Karmee, S.K. A Spent Coffee Grounds Based Biorefinery for the Production of Biofuels, Biopolymers, Antioxidants and Biocomposites. *Waste Manag.* 2018, 72, 240–254.
6. Dattatraya Saratale, G.; Bhosale, R.; Shobana, S.; Banu, J.R.; Pugazhendhi, A.; Mahmoud, E.; Sirohi, R.; Kant Bhatia, S.; Atabani, A.E.; Mulone, V.; et al. A Review on Valorization of Spent Coffee Grounds (SCG) towards Biopolymers and Biocatalysts Production. *Bioresour. Technol.* 2020, 314, 123800.
7. Magalhães, L.M.; Machado, S.; Segundo, M.A.; Lopes, J.A.; Páscoa, R.N.M.J. Rapid Assessment of Bioactive Phenolics and Methylxanthines in Spent Coffee Grounds by FT-NIR Spectroscopy. *Talanta* 2019, 147, 460–467.
8. Vitale, E.; Motta, C.M.; Avallone, B.; Amoresano, A.; Fontanarosa, C.; Battaglia, G.; Spinelli, M.; Fogliano, C.; Paradiso, R.; Arena, C. Sustainable Reuse of Espresso Coffee By-Products as a Natural Fertilizer to Improve Growth and Photosynthesis in Cucumber (*Cucumis Sativus* L.) Plants. *Waste Biomass Valorization* 2024, 15, 543–559.
9. Енергетична, екологічна та економічна оцінка ефективності організації використання твердого біопалива [Текст] / Є. М. Олійник, В. І.

Зубенко // Теплофізика та теплоенергетика : Український науковий журнал. - 2020. - № 1. - С. 52-59 . - ISSN 2663-7235

10. Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія. /За ред. В.В. Клименка – Кропивницький :ПП «Ексклюзив-Систем», 2020. – 162 с.

11. Теплов Д.І., Тігарєв А.М., Тігарєва Т.Г. Розробка структури системи регулювання температури повітря і вологості у сушарці деревини. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-практичної конференції. – 2022.– Одеса.: –С.137–140.

12. Padma Ishwarya, S.; Nisha, P. Foaming Agents from Spent Coffee Grounds: A Mechanistic Understanding of the Modes of Foaming and the Role of Coffee Oil as Antifoam. *Food Hydrocoll.* 2021, 112, 106354.

13. Alonazi, M.; Al-Diahan, S.K.; Alzahrani, Z.R.A.; Ben Bacha, A. Combined Immobilized Lipases for Effective Biodiesel Production from Spent Coffee Grounds. *Saudi J. Biol. Sci.* 2023, 30, 103772.

14. Bhaskar, T.; Pandey, A.; Mohan, S.V.; Lee, D.J.; Khanal, S.K. Waste Biorefinery: Potential and Perspectives. In *Waste Biorefinery: Potential and Perspectives*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; pp. 1–870.

15. Rajesh Banu, J.; Kavitha, S.; Yukesh Kannah, R.; Dinesh Kumar, M.; Preethi; Atabani, A.E.; Kumar, G. Biorefinery of Spent Coffee Grounds Waste: Viable Pathway towards Circular Bioeconomy. *Bioresour. Technol.* 2020, 302, 122821.

16. Bomfim, A.S.C.D.; Colantoni, A.; Paris, E.; Bianchini, L.; Ferri, S.; Marcantonio, V.; Carnevale, M.; Palma, A.; Civitarese, V.; Gallucci, F. Spent Coffee Ground Characterization, Pelletization Test and Emissions Assessment in the Combustion Process. *Sci. Rep.* 2021, 11, 5119.

17. Tapangnoi, P.; Obruca, S.; Benesova, P.; Kucera, D.; Petrik, S.; Marova, I. Biotechnological Conversion of Spent Coffee Grounds into Polyhydroxyalkanoates and Carotenoids. *New Biotechnol.* 2019, 32, 569–574.

18. Pujol, D.; Sharma, H.; Sharma, H. A Detail Chemistry of Coffee and Its Analysis. In *Coffee-Production and Research*; IntechOpen: London, UK, 2020; pp. 1–3.
19. Ballesteros, L.F.; de Melo Pereira, G.V.; de Carvalho Neto, D.P.; Magalhães Júnior, A.I.; do Prado, F.G.; Pagnoncelli, M.G.B.; Karp, S.G.; Soccol, C.R. Chemical Composition and Health Properties of Coffee and Coffee By-Products. *Adv. Food Nutr. Res.* 2020, 91, 65–96.
20. Singh, T.A.; Pal, N.; Sharma, P.; Passari, A.K. Spent Coffee Ground: Transformation from Environmental Burden into Valuable Bioactive Metabolites. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2023, 22, 887–898.
21. Ballesteros, L.F.; Teixeira, J.A.; Mussatto, S.I. Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food Bioprocess Technol.* 2024, 7, 3493–3503.
22. Brekalo, M.; Rajs, B.B.; Aladić, K.; Jakobek, L.; Šereš, Z.; Krstović, S.; Jokić, S.; Budžaki, S.; Strelec, I. Multistep Extraction Transformation of Spent Coffee Grounds to the Cellulose-Based Enzyme Immobilization Carrier. *Sustainability* 2023, 15, 13142.
23. Muthukumar, G.; Mahadevan, A. Microbial Degradation of Lignin: Conversion, Application, and Challenges. *J. Sci. Ind. Res. (India)* 2022, 42, 195–219.