

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФОМИЧ МИХАЙЛО ІВАНОВИЧ

УДК 631.11:620.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБУ ОБРОБЛЕННЯ БІОМАСИ СТЕБЕЛ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР**

13 – Механічна інженерія

133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М. І. Фомич

Науковий керівник:

Ягелюк Світлана Володимирівна,

доктор технічних наук, професор

Луцьк – 2025

АНОТАЦІЯ

Фомич М.І. Удосконалення засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2024 р.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур. У ній вирішено нове наукове завдання, що полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів процесу ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур у компактні паливні рулони шляхом розроблення пресувальної камери змінного об'єму та вдосконалення способу збирання біомаси для підвищення ефективності її переробки.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та поставлено задачі дослідження. Описано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та наведено особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях. Наведено відомості щодо апробації та опублікування результатів наукових досліджень, структуру та обсяг дисертаційного дослідження.

Метою дослідження є підвищення якості ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур у компактні паливні рулони шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи засобу оброблення й вдосконалення способу збирання біомаси.

Мета досягнута за рахунок вирішення таких задач: розробки класифікації залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, видів твердого біопалива з них та засобів для їх оброблення; обґрунтування параметрів пресувальної камери змінного об'єму та дослідження взаємодії підпружинених роликів з біомасою стебел сільськогосподарських культур під час формування компактних паливних рулонів; поглиблення досліджень фізико–механічних властивостей стебел льону, колосових зернових культур та їх подрібненої маси, розробки математичної моделі процесу ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур для визначення

раціональних параметрів формування компактних паливних рулонів у пресувальній камері змінного об'єму; вдосконалення способу збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур, дослідження якісного та кількісного складу викидів димових газів під час спалювання нового твердого біопалива; визначення комплексного показника якості твердого біопалива та економічного ефекту впровадження розробленої камери змінного об'єму для формування компактних паливних рулонів.

Об'єкт дослідження – спосіб збирання, процес формування компактних паливних рулонів та робочі органи обладнання для ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур.

Предмет дослідження – вплив конструктивних і технологічних параметрів процесу та засобів ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур на якість формування компактних паливних рулонів.

На основі проведених досліджень обґрунтовано раціональні параметри пресувальної камери змінного об'єму для формування паливних рулонів із біомаси стебел льону та колосових зернових, визначено вплив тиску ущільнення та вмісту стебел льону в біомасі на щільність паливних рулонів, а також встановлено якісні характеристики та екологічні показники використання отриманого біопалива. Як наслідком:

– *вперше* розроблено математичну модель, що описує процес регулювання ущільнення біомаси стебел із різним пропорційним вмістом льону та колосових зернових у пресувальній камері змінного об'єму шляхом зміни режимів пресування, що дозволяє прогнозувати якісні характеристики готових паливних рулонів.

– *вперше* запропоновано спосіб збирання, який забезпечує можливість часткового біологічного саморозкладу стеблових компонентів сільськогосподарських культур.

– *вперше* досліджено вплив пропорційного співвідношення біомаси льону та колосових зернових у складі твердого палива на ефективність згоряння та екологічні показники викидів.

Вдосконалено конструкцію пресувальної камери змінного об'єму шляхом оптимізації параметрів пружин стиску та роликів на основі трьох фаз формування, що сприяє досягненню більшої щільності та структурної стабільності компактних паливних рулонів.

Подальшого розвитку набуло дослідження впливу механічних характеристик стебел льону та колосових зернових на процес їх подрібнення, що дає змогу раціонально обирати параметри обладнання для оброблення біомаси.

У першому розділі проаналізовано основні тенденції розвитку виробництва колосових зернових та технічних культур, розглянуто походження, види, властивості залишків (стебел) сільськогосподарських культур, напрями використання біомаси стебел сільськогосподарських культур, у тому числі для виготовлення твердого палива, розглянуто конструкції існуючих машин для оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур, тобто для пресування та брикетування, проаналізовано результати теоретичних та експериментальних досліджень властивостей стебел льону, колосових зернових культур. Проаналізовано існуючі дослідження конструктивних рішень машин для ущільнення соломи стебел. Проте багато питань залишаються недослідженими, а саме: не узагальнено в єдиній класифікації інформацію щодо залишків стебел, видів твердого біопалива з них та засобів для їх виробництва; не досліджено процес формування компактних паливних рулонів з різним складом біомаси стебел сільськогосподарських культур у стаціонарному засобі оброблення; не проведено порівняння фізико-механічних властивостей стебел льону, колосових зернових культур та їх подрібненої маси, не досліджено якісний та кількісний склад викидів димових газів під час спалювання твердого біопалива; не проводилась комплексна оцінка якості твердого біопалива з різним складом біомаси стебел сільськогосподарських культур. Це вимагає теоретичного та експериментального дослідження взаємодії робочих органів вдосконаленої пресувальної камери змінного об'єму з біомаси стебел сільськогосподарських культур в процесі її ущільнення та скручування у компактні паливні рулони, а також оцінки якості та екологічності отриманого твердого біопалива.

У другому розділі наведено програму досліджень, обґрунтовано класифікацію залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, визначено види палива, теоретично проаналізовано процес формування паливних рулонів із біомаси стебел сільськогосподарських культур у камері пресування змінного об'єму.

Для підвищення ефективності компактних паливних рулонів обґрунтовано конструкцію камери пресування змінного об'єму, що забезпечує рівномірне ущільнення компактних паливних рулонів за рахунок підбору раціональних параметрів пружин. Конструкція камери пресування змінного об'єму включає систему підпружинених роликів, що змінюють своє положення під дією сили ущільнення, дозволяючи рівномірно розподілити тиск по всій площі рулону. Пружинний механізм регулювання притисної сили змінює свою жорсткість залежно від ступеня ущільнення рулону, забезпечуючи поступове збільшення тиску на біомасу. При надходженні біомаси в камеру пресування змінного об'єму вона рівномірно розподіляється та ущільнюється під дією обертових роликів. В процесі формування компактних паливних рулонів ролики змінюють своє положення, регулюючи силу ущільнення, що забезпечує необхідну щільність рулону. Після завершення процесу ущільнення гідроциліндр вивільняє сформований рулон, після чого камера пресування змінного об'єму переходить у вихідний стан для початку наступного циклу.

Встановлено, що при мінімальній допустимій щільності компактного паливного рулону $\rho = 80,1 \text{ кг/м}^3$ раціональні параметри пружин стиску складають: жорсткість $C_1 = 2100 \text{ Н/м}$, $C_2 = 3500 \text{ Н/м}$, $C_3 = 2500 \text{ Н/м}$, а нормальна сила притискання роликів становить 1353 Н . При максимальній допустимій щільності компактного паливного рулону $\rho = 139,3 \text{ кг/м}^3$ раціональні параметри пружин стиску складають: жорсткість $C_1 = 4550 \text{ Н/м}$, $C_2 = 5750 \text{ Н/м}$, $C_3 = 5350 \text{ Н/м}$, а нормальна сила притискання роликів – 2684 Н .

Запропоновано вдосконалену конструкцію камери пресування змінного об'єму та спосіб часткового збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур. Вдосконалена конструкція камери пресування змінного об'єму включає в себе встановлення двох нескінченних транспортерних стрічок, одна з яких подає

матеріал в п'яти–роликову камеру змінного об'єму, друга виконує роль транспортування готових компактних паливних рулонів, п'яти роликів (вальців), розташованих на підпружинених рамках, гідроциліндра, який при готовності компактного паливного рулону опускає два ролики (одну з рамок), який в свою чергу дозволяє рулону звільнити кам, обмежувальної планки, пружин стиску, які забезпечують необхідну щільність компактних паливних рулонів, електродвигуна який приводить в рух ролики та транспортерну стрічку за допомогою клинових пасів.

Спосіб часткового збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур включає в себе удосконалення конструкції підбирача–подрібнювача, що передбачає наявність трьох розгалужень розподільника, що забезпечує можливість вибіркового збирання частини біомаси стебел сільськогосподарських культур. Такий підхід дозволяє одночасно залишати частину подрібненої біомаси на полі для повернення поживних речовин у ґрунт, а іншу частину – спрямовувати на збирання для подальшого використання, зокрема як сировини для виготовлення паливних матеріалів.

У третьому розділі показано опис обладнання та методик проведення експериментальних досліджень. Вони включають методику визначення вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур, компактних паливних рулонів, паливних брикетів; дослідження впливу пружних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур на процес відновлення; визначення зусилля подрібнення біомаси стебел сільськогосподарських культур; метод математичного планування експерименту визначення щільності компактних паливних рулонів із різним пропорційним вмістом льону та колосових зернових; методику пресування зразків компактних паливних рулонів із різним пропорційним вмістом льону та колосових зернових; методику дослідження екологічності згорання паливних брикетів за допомогою спектрофотометра; методику випробувань отриманих видів твердого палива; метод комплексної оцінки якості компактних паливних рулонів.

У четвертому розділі показано результати реалізації програми експериментальних досліджень. Наведені характеристики досліджуваних зразків

сільськогосподарських культур – озимої пшениці, льону олійного, льону довгунця які вирощенні на дослідних ділянках ЛНТУ, Володимир–Волинського ЦПО, фермерського господарства Агротрейд ПСС за період 2021–2024 рр. Охарактеризовано вегетаційний період рослин, технічна довжина, діаметр стебла, врожайність насіння та соломи. Отримано подрібненні залишки стебел пшениці та льону олійного з метою виготовлення ПБ. Отримано зразки готового твердого палива, описано їх геометричні параметри та вміст складових частин БССК у ПР.

Визначено вологість стебел сільськогосподарських культур після збирання основного врожаю, яка становить для пшениці озимої – 21,7%, льону–олійного 27,3. Визначено вологість стебел сільськогосподарських культур після зберігання на полі протягом 5 днів: за середньодобової температури 20–24°C та без опадів склала для пшениці озимої 12,9%, льону–довгунця 16,8%, льону олійного 14,6%. Вологість стебел сільськогосподарських культур суттєво знижується після вилежування на полі, що сприяє зменшенню витрат на сушіння та підвищує ефективність використання сировини у виробництві паливних матеріалів. Визначено вологість компактних паливних рулонів під час їх виготовлення, що склала для компактних паливних рулонів складом Л75/П25 – 9,1-11,0%, Л50/П50 – 8,7-10,0, Л25/П75 – 8,3-9,0. Вимірювання вологості компактних паливних рулонів свідчить про її рівномірне розподілення. Додавання соломи колосових зернових до складу рулонів знижує загальну вологість. Використання соломи колосових зернових як складової частини біомаси стебел сільськогосподарських культур є більш ефективним для зниження вологості, що може зменшити витрати на сушіння та покращити енергетичні характеристики кінцевого продукту. Результатом дослідження змін вологості компактних паливних рулонів за різних умов стало те, що тривале зберігання ПР у сухому приміщенні протягом одного місяця з вологістю 40-60% та температурою 20-24 °C сприяє поступовому її зменшенню, що покращує їхні енергетичні характеристики. Водночас короткострокове зберігання у сирому середовищі призводить до інтенсивного вбирання вологи, що може негативно впливати на якість палива та його горючі властивості. Отже, для мінімізації небажаного підвищення вологості компактних паливних рулонів доцільно забезпечити їхнє

зберігання в умовах із контрольованими параметрами вологості та температури. Надмірний вміст льону призводить до збільшення вологості, що впливає на кінцеві показники якості.

Дослідження процесу скручування, вплив пружних властивостей стебел сільськогосподарських культур на її відновлення показав, що після дії навантаження стебла сільськогосподарських культур змінюють свої геометричні розміри. Варто зазначити, що після зняття навантаження стебла відновлюють свої розміри не повністю, їх товщина зменшується на 10-15%. Результати досліджень підтверджують доцільність максимального руйнування стебел сільськогосподарських культур на всіх етапах збирання для формування компактних паливних рулонів без обв'язування. Зменшення пружних властивостей стебел льону та пшениці сприяє досягненню необхідної щільності компактних паливних рулонів під час та після їхнього формування. Завдяки більш вираженим релаксаційним властивостям стебел пшениці їх доцільно подрібнювати до менш дрібніших частинок і використовувати як наповнювач у складі компактних паливних рулонів. Водночас стебла льону доцільно застосовувати як в'язучий компонент для забезпечення структурної стабільності рулонів.

Дослідження зусилля подрібнення стебел колосових культур та льону показує, що зусилля різання стебел сільськогосподарських культур суттєво залежить як від вологості матеріалу, так і від відстані від кореня. Для льону олійного при вологості 15,6% зусилля різання пучка з п'яти стебел зменшується з 7,5 Н (біля кореня) до 5,1 Н (верхня частина), а при вологості 54,2% — з 6,2 Н до 3,9 Н. У льону-довгунця аналогічна тенденція: при вологості 19,4% зусилля для п'яти стебел змінюється від 7,8 Н до 5,7 Н, при 56% — від 6,4 Н до 3,4 Н. Найбільші зусилля різання спостерігались у стебел пшениці. Для озимої пшениці при вологості 12,1% зусилля різання пучка з п'яти стебел зменшується з 47,4 Н до 32,7 Н, а при 56,8% — з 32,1 Н до 19,9 Н.

Дослідження щільності компактних паливних рулонів методом математичного планування експерименту підкреслює значний потенціал біомаси стебел сільськогосподарських культур. Регресійний аналіз показує, що досягнення

щільності від 110 до 130 кг/м³ потребує тиску ущільнення 0,40–0,55 МПа та об'єму подачі 0,65–0,75 м³ погонного метра БССК залежно від співвідношення стебел льону з стеблами пшениці або іншими матеріалами. Вищий вміст стебел льону через його волокнисті властивості вимагає підвищеного тиску для забезпечення рівномірної щільності та когезії матеріалу.

На основі проведених досліджень спектрів витяжок залишків горіння зразків твердих паливних матеріалів можна зробити висновок, що додавання більшого вмісту соломи пшениці до паливних брикетів зразка Л25/П75 впливає на зміну характеристик зольного залишку, зокрема збільшує кількість нерозчинних компонентів і змінює спектральні властивості витяжки. Збільшення вмісту льону в паливних брикетах збільшує значення пропускання Л75/П25, що свідчить про більш однорідну структуру продуктів згорання. Водночас зразок Л50/П50 демонструє більшу схожість із контрольним зразком деревини, що вказує на оптимальні характеристики для процесу згорання. Усі досліджені зразки витяжок із зольних залишків продуктів горіння паливних брикетів із біомаси стебел сільськогосподарських культур є екологічно безпечними та не містять значної кількості небезпечних домішок.

Під час експериментальних досліджень згорання твердого палива із біомаси стебел сільськогосподарських культур, зокрема паливних брикетів з льону та соломи, було визначено якісний та кількісний склад димових газів за допомогою газоаналізатора Testo 340. Результати показали зниження викидів СО та NO_x зі збільшенням частки соломи в паливі, при цьому зменшуючи теплопродуктивні показники, проте результати свідчать про екологічну доцільність такого палива. Результати промислового випробування у котельні на базі ЛНТУ підтвердили ефективність використання твердого палива – компактних паливних рулонів із біомаси стебел сільськогосподарських культур. Зокрема, при співвідношенні Л75/П25 досягнуто найкращих показників теплопродуктивності – 0,420 Гкал/год, для співвідношення Л50/П50 – 0,394 Гкал/год, на останньому місці співвідношення Л25/П75 – 0,367 Гкал/год.

Пропорційне співвідношення льону та пшениці у складі паливного рулону значно впливає на екологічні показники викидів. Збільшення частки пшениці сприяє зниженню викидів CO та NO_x, що покращує екологічну ситуацію. Водночас оптимальне співвідношення для досягнення компромісу між ефективністю згоряння, тепловим ККД та екологічними показниками становить Л50/П50 або Л75/П25. Вибір конкретного складу має враховувати як екологічні вимоги, так і економічні розрахунки.

У п'ятому розділі наведено значення комплексних показників якості, які становили 0,84, 0,98 і 1,05 для варіантів Л75/П25, Л50/П50 і Л25/П75 відповідно. Склад Л25/П75 досяг найвищого комплексного показника якості, що вказує на те, що він забезпечує найкращий баланс між ефективністю згоряння та рівнем викидів. Хоча щільність ПР нижча порівняно зі звичайним деревним паливом, а вміст сірки трохи вищий, ніж у дубових дровах, загальні викиди менші. Це свідчить про те, що компактні паливні рулони, незважаючи на те, що вони виробляються із біомаси стебел сільськогосподарських культур, забезпечують збалансовану ефективність спалювання та прийнятні екологічні показники.

Аналіз економічної ефективності використання паливних рулонів із різним співвідношенням льону до соломи колосових зернових показує, що найбільший економічний ефект досягається при складі 75% льону та 25% соломи пшениці – Л75/П25. Якщо сировина закуповується, економія для складу ПР Л75/П25 становить від 31 927,63 грн до 38 817,63 грн за опалювальний сезон. У випадку, коли сировина не закуповується, економія значно зростає – до 603 837,63 грн за сезон.

Ключові слова: Біомаса, стебла, солома, льон, колосові зернові культури, технологія збирання, обробка (оброблення), властивості, тверде біопаливо, паливні брикети, паливні рулони, пресувальна камера, щільність, якість, математичне моделювання

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Фомич М. І. Технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів. Сільськогосподарські машини. 2023. №49. С 53-59. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1020>
2. Ягелюк С.В., Фомич М.І., Голій О.В., Хомич А.В. Ідентифікація та класифікація залишків сільськогосподарських культур для подальшого використання. Сільськогосподарські машини. 2021. № 47. С 95 – 101. *(Автору належить аналіз експериментальних даних на якого встановлено ідентифікаційні та класифікаційні ознаки рослинної біомаси сільськогосподарських культур)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.654>
3. Ягелюк С. В. Фомич М.І., Ягелюк О.О. Сучасні технології переробки біомаси луб'яних культур. Сільськогосподарські машини. 2022. № 48. С 59 – 66. *(Автору належить аналіз даних та розробка схеми етапів переробки льону з подальшим використанням отриманої продукції для виготовлення товарів різного функціонального призначення)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.841>
4. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф., Фомич М.І. Властивості біомаси стебел сільськогосподарських культур. Товарознавчий вісник. 2023. № 16. С 235 - 243. *(Автору належить узагальнений аналіз властивостей та показників якості біомаси стебел сільськогосподарських рослин)* <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2023-17-19>
5. Ягелюк С.В., Фомич М.І. Класифікація видів палива із біомаси сільськогосподарських культур. 2024. Сільськогосподарські машини. №50. С 72-80. *(Автору належить аналіз сировини та видів палива з біомаси сільськогосподарських культур як основа для розробки класифікації)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1382>
6. Yaheliuk S., Fomych M., Rechun O. Global market trends of grain and industrial crops. Commodity Bulletin. 2024. №17(1). 134-145. *(Автору належить аналіз динаміки вирощування зернових культур у світі)* <https://doi.org/10.62763/ef/1.2024.134>

Статті у наукових виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus:

7. Yaheliuk S., Didukh V., Fomich M., Yaheliuk O., Kuzmina T., Boiko G. Optimization of technological parameters for fuel roll production using agricultural crop stem biomass. *Inmatch - Agricultural Engineering*. 2025. 75. 243-252. *(Автори належить дослідження щільності ПР з різним співвідношенням складових частин методом математичного планування експерименту)*
<https://doi.org/10.35633/inmatch-75-21>

Тези доповідей, матеріали наукових конференцій:

1. Ягелюк С. В., Фомич М. І. Огляд сучасних ліній переробки конопель та льону олійного: тези доповідей VI Міжнародної науково–практичної конференції молодих учених та студентів "Якість та безпечність товарів" (Луцьк, 13 травня 2022 р.) / Луцький національний технічний університет. - Луцьк, 2022. - С. 161-162. *(Автори належить огляд сучасних ліній переробки льону олійного)*.

2. Фомич М. І. Нові рослинні джерела енергії у контексті відбудови України: тези доповідей Міжнародної науково–практичної конференції, присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (29-30 вересня 2022 р.). - Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022. - С. 83-84.

3. Фомич М. І. Можливість виготовлення будівельних матеріалів з відходів сільськогосподарських рослин: матеріали Міжнародної науково–практичної конференції "Молодіжна наука заради миру та розвитку" (Чернівці, 9-11 листопада 2022 р.) / Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. - Чернівці, 2022. - С. 595-597.

4. Фомич М. І. Сучасна нормативна база для оцінки якості твердого палива із залишків сільськогосподарських рослин: матеріали VII Міжнародної науково–практичної конференції молодих учених та студентів "Якість та безпечність товарів"

(Луцьк, 28 квітня 2023 р.). Луцький національний технічний університет, - Луцьк, 2023. - С. 81-82.

5. Фомич М. І. Обладнання та технології для виготовлення паливних матеріалів із рослинної біомаси: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції "Інноваційні технології в АПК" (Луцьк, 7-8 червня 2023 р.) / Луцький національний технічний університет. - Луцьк, 2023. – С. 180–181.

6. Yaheliuk S., Diduh V., Yaheliuk O., Fomych M. "Modern Trends in the Agricultural Higher Education" (Chişinău, Moldova, 5–6 October 2023). – Chişinău, Moldova, 2023. – P. 151–151 (Автору належить дослідження раціональних параметрів камери пресування змінного об'єму).

7. Фомич М. І. Сучасний стан виробництва електроенергії з нетрадиційних видів палива: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів "Якість та безпечність товарів" (Луцьк, 5 квітня 2024 р.) / Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2024. – С. 161–163.

8. Фомич М. І. Властивості насіння льону: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових і переробних виробництв та ресторанного господарства" (Луцьк, 24 квітня 2024 р.) / Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2024. – С. 71.

ANNOTATION

M.Fomych. Improvement of a Biomass Processing Tool for Agricultural Crop Stems. – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

The Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field 13 Mechanical Engineering, specialty 133 Industrial Engineering. Lutsk National Technical University, Lutsk, 2024.

The Thesis is devoted to the improvement of a processing tool for agricultural crop stem biomass. A new scientific problem has been solved, which consists in justifying the rational parameters of the compaction process of agricultural crop stem biomass into compact fuel rolls by developing a variable-volume pressing chamber and improving the biomass harvesting method to enhance processing efficiency.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the aim, and outlines the research objectives. It describes the scientific novelty, the practical significance of the obtained results, and presents the applicant's personal contribution to the conducted research. Information is provided on the approbation and publication of the research results, as well as the structure and volume of the Thesis.

The aim of the research is to improve the quality of compaction of agricultural crop stem biomass into compact fuel rolls by justifying rational parameters and operating modes of the processing tool and improving the biomass harvesting method.

The aim was achieved by solving the tasks: developing a classification of agricultural crop stem biomass residues, types of solid biofuel derived from them, and tools for their processing; improving the biomass harvesting method; justifying the parameters of a variable-volume pressing chamber and studying the interaction of spring-loaded rollers with stem biomass during the formation of compact fuel rolls; deepening the study of the physical and mechanical properties of flax and cereal crop stems and their crushed mass, developing a mathematical model of the biomass compaction process to determine rational parameters for forming compact fuel rolls in a variable-volume pressing chamber; studying the qualitative and quantitative composition of flue gas emissions during the combustion of the new solid biofuel; determining the integrated quality

indicator of solid biofuel and the economic effect of implementing the developed variable-volume chamber for forming compact fuel rolls.

Object of the research – the method of harvesting agricultural stem biomass and the process of its compaction into compact fuel rolls.

Subject of the research – parameters of the process and the tool for compacting agricultural stem biomass into compact fuel rolls.

Based on the conducted studies, rational parameters of a variable-volume pressing chamber for forming fuel rolls from flax and cereal stem biomass were justified. The influence of compaction pressure and flax content in the biomass on the density of fuel rolls was determined, and the qualitative characteristics and environmental indicators of the resulting biofuel were established. As a result:

- For the first time, a mathematical model of the process of regulating the compaction of stem biomass with varying proportions of flax and cereals in a variable-volume pressing chamber was developed by changing the pressing modes. This allows for predicting the qualitative characteristics of the finished fuel rolls.

- A harvesting method was proposed for the first time that enables partial biological self-decomposition of the agricultural crop stem components.

- The effect of the proportional ratio of flax and cereal biomass in solid fuel on combustion efficiency and environmental emission indicators was studied for the first time.

The construction of the variable-volume pressing chamber was improved by optimizing the compression spring and roller parameters based on three formation phases, which helps achieve greater density and structural stability of compact fuel rolls.

Further development was given to the study of the impact of the mechanical characteristics of flax and cereal stems on their crushing process, which enables the rational selection of equipment parameters for biomass processing.

Chapter 1 analyzes the main trends in the development of cereal and industrial crop production, examines the origin, types, and properties of agricultural stem residues, and explores the directions of using stem biomass, including for solid fuel production. The structures of existing machines for processing stem biomass—specifically for pressing and

briquetting are reviewed, along with the results of theoretical and experimental studies of flax and cereal stems. Existing research on the structural solutions of straw compaction machines is also analyzed. However, many issues remain unexplored, namely: no unified classification of stem residues, types of solid biofuel from them, and processing tools has been established; the process of forming compact fuel rolls from various biomass compositions in a stationary processing tool has not been studied; comparisons of the physical and mechanical properties of flax and cereal stems and their crushed mass have not been conducted; the qualitative and quantitative composition of flue gas emissions during solid biofuel combustion has not been studied; and there has been no comprehensive assessment of the quality of solid biofuel from different biomass compositions. These gaps require theoretical and experimental investigation of the interaction between the working components of the improved variable-volume pressing chamber and the stem biomass during its compaction and rolling into compact fuel rolls, as well as an assessment of the quality and environmental performance of the resulting solid biofuel.

Chapter 2 presents the research program, provides a classification of agricultural stem biomass residues, identifies fuel types, and theoretically analyzes the process of forming fuel rolls from stem biomass in a variable-volume pressing chamber.

To improve the efficiency of compact fuel rolls, the design of the variable-volume pressing chamber was justified. It ensures uniform compaction of fuel rolls by selecting rational spring parameters. The chamber design includes a system of spring-loaded rollers that change position under the force of compaction, allowing pressure to be evenly distributed across the roll area. The spring mechanism for regulating clamping force changes stiffness depending on the compaction level, ensuring a gradual increase in pressure on the biomass. As biomass enters the variable-volume pressing chamber, it is evenly distributed and compacted by rotating rollers. During roll formation, the rollers adjust their position to regulate compaction force, ensuring the required roll density. Upon completion of the compaction process, the hydraulic cylinder releases the formed roll, after which the chamber resets for the next cycle.

It was found that at a minimum allowable density of compact fuel rolls ($\rho = 80.1 \text{ kg/m}^3$), rational spring parameters are: stiffness $C_1 = 2100 \text{ N/m}$, $C_2 = 3500 \text{ N/m}$, $C_3 = 2500 \text{ N/m}$, and the normal pressing force of the rollers is 1353 N. At the maximum allowable density ($\rho = 139.3 \text{ kg/m}^3$), the rational spring parameters are: stiffness $C_1 = 4550 \text{ N/m}$, $C_2 = 5750 \text{ N/m}$, $C_3 = 5350 \text{ N/m}$, and the normal pressing force of the rollers is 2684 N.

An improved design of the variable-volume pressing chamber and a method for partial harvesting of stem biomass were proposed. The improved chamber includes two endless conveyor belts (one feeds the material into a five-roller variable-volume chamber; the other transports finished compact fuel rolls), five rollers mounted on spring-loaded frames, a hydraulic cylinder that lowers two rollers (one frame) to release the roll when it is formed, a limiting bar, compression springs to ensure roll density, and an electric motor that drives the rollers and conveyor belt via V-belts.

The partial harvesting method includes an improved pickup–shredder design with a three-way distributor, enabling selective harvesting of part of the biomass. This approach allows part of the crushed biomass to be left in the field to return nutrients to the soil, while the rest is collected for further use, particularly as raw material for fuel production.

Chapter 3 describes the equipment and experimental methods. These include methods for determining moisture content in stem biomass, compact fuel rolls, and briquettes; studying the effect of biomass elasticity on recovery; measuring the force required to crush biomass; experimental design methodology for determining fuel roll density with varying flax–cereal ratios; pressing techniques for compact fuel roll samples with different ratios; environmental combustion testing using a spectrophotometer; fuel testing methods; and an integrated quality assessment method for compact fuel rolls.

Chapter 4 presents the results of the experimental research program. It provides characteristics of the studied samples of agricultural crops – winter wheat, oilseed flax, and fibre flax – grown in experimental plots of Lutsk National Technical University (LNTU), the Volodymyr-Volynskyi Center for Vocational Education, and the Agrotreid PSS farm during 2021–2024. The vegetation period, technical length, stem diameter, seed and straw yield of the plants are described. Crushed residues of wheat and oilseed flax stems were obtained for the purpose of producing fuel rolls (FR). Samples of solid biofuel

were produced, and their geometric parameters as well as the content of agricultural crop stem biomass components in the fuel rolls were described.

The moisture content of agricultural crop stems after harvesting was determined: 21.7% for winter wheat and 27.3% for oilseed flax. After five days of field exposure at an average daily temperature of 20–24°C and no precipitation, moisture decreased to 12.9% for winter wheat, 16.8% for fibre flax, and 14.6% for oilseed flax. Moisture content significantly drops after lying in the field, which helps reduce drying costs and improves the efficiency of raw material use in fuel production. The moisture content of compact fuel rolls at the time of production was measured: 9.1–11.0% for F75/W25 composition, 8.7–10.0% for F50/W50, and 8.3–9.0% for F25/W75. The moisture distribution in compact fuel rolls was found to be uniform. The addition of cereal straw reduces overall moisture content. Using cereal straw as part of PSBC is more effective in lowering moisture, which can reduce drying costs and enhance the energy characteristics of the final product. Long-term storage of FRs in a dry environment for one month (at 40–60% humidity and 20–24°C) leads to a gradual reduction in moisture, improving energy performance. In contrast, short-term storage in humid conditions results in intensive moisture absorption, which may negatively affect fuel quality and combustion properties. Thus, to minimize undesired moisture increase in FRs, storage conditions with controlled humidity and temperature should be ensured. Excessive flax content increases moisture, affecting final quality indicators.

Research on the rolling process and the influence of the elastic properties of plant stems on their recovery showed that after loading, the stem geometry changes. After unloading, the stems only partially restore their original size, with thickness decreasing by 10–15%. The results confirm the importance of maximum stem destruction at all harvesting stages to form compact fuel rolls without binding. Reducing the elastic properties of flax and wheat stems helps achieve the necessary density during and after FR formation. Due to stronger relaxation properties, wheat stems should be shredded into smaller particles and used as filler in FRs, while flax stems should serve as a binder to ensure structural stability.

Research into cutting forces of cereal and flax stems showed that cutting effort depends significantly on stem moisture and the cutting point's distance from the root. For oilseed flax at 15.6% moisture, cutting force for a bundle of five stems decreases from 7.5 N (at the root) to 5.1 N (upper part), and at 54.2% moisture – from 6.2 N to 3.9 N. A similar trend was observed in fibre flax: at 19.4% moisture, the force decreases from 7.8 N to 5.7 N, and at 56% – from 6.4 N to 3.4 N. The highest cutting forces were observed in wheat stems. For winter wheat at 12.1% moisture, the force decreases from 47.4 N to 32.7 N, and at 56.8% – from 32.1 N to 19.9 N.

Studies on the density of compact fuel rolls using experimental design methods highlight the significant potential of PSBC. Regression analysis showed that achieving a density of 110–130 kg/m³ requires a compaction pressure of 0.40–0.55 MPa and a feed volume of 0.65–0.75 m³ per linear meter of PSBC, depending on the flax-to-wheat ratio. A higher flax content, due to its fibrous nature, requires increased pressure to ensure uniform density and cohesion.

Based on the analysis of ash extract spectra from the combustion residues of solid biofuels, it was found that increasing wheat straw content in F25/W75 fuel briquettes changes the ash residue characteristics – specifically, the quantity of insoluble components increases, and spectral properties of the extract change. Increasing flax content increases transmittance in F75/W25 samples, indicating a more homogeneous combustion product structure. The F50/W50 sample shows the greatest similarity to the control wood sample, indicating optimal combustion properties. All studied ash extracts from briquettes made of agricultural crop stem biomass are environmentally safe and do not contain significant amounts of hazardous substances.

During combustion experiments of solid biofuels from agricultural crop stem biomass, including flax and straw briquettes, the qualitative and quantitative composition of flue gases was measured using a Testo 340 gas analyzer. Results showed a decrease in CO and NO_x emissions with an increased straw proportion, though with slightly lower heat output. However, the overall findings support the ecological viability of this fuel. Industrial tests in the LNTU boiler room confirmed the effectiveness of compact fuel rolls from agricultural crop stem biomass. The F75/W25 ratio yielded the highest heat

productivity – 0.420 Gcal/h, followed by F50/W50 – 0.394 Gcal/h, and F25/W75 – 0.367 Gcal/h.

The flax-to-wheat ratio in FRs significantly affects emission indicators. Increasing the wheat share reduces CO and NO_x emissions, improving environmental conditions. The optimal ratio balancing combustion efficiency, heat performance, and environmental impact is F50/W50 or F75/W25. The specific composition should be selected considering both ecological and economic factors.

Chapter 5 presents the values of integrated quality indicators, which were 0.84, 0.98, and 1.05 for F75/W25, F50/W50, and F25/W75, respectively. The F25/W75 composition achieved the highest quality index, indicating the best balance between combustion efficiency and emission level. Although fuel rolls density is lower than conventional wood fuel and sulfur content is slightly higher than in oak firewood, total emissions are lower. This confirms that compact fuel rolls from PSBC offer balanced combustion efficiency and acceptable environmental performance.

An analysis of the economic efficiency of fuel rolls with various flax-to-straw ratios shows that the highest economic benefit is achieved with 75% flax and 25% wheat straw (F75/W25). If raw materials are purchased, the savings range from UAH 31,927.63 to UAH 38,817.63 per heating season. If raw materials are self-produced, savings increase significantly – up to UAH 603,837.63 per season.

Keywords: Biomass, stalks, straw, flax, eared cereals, harvesting technology, processing (processing), properties, solid biofuel, fuel briquettes, fuel rolls, pressing chamber, density, quality, mathematical modelling.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THESIS

Articles in the Ukrainian special scientific press:

1. Fomych M. I. Technologies and equipment for the production of fuel briquettes. *Agricultural machinery*. 2023. No. 49. P. 53-59. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1020>
2. Yageliuk S.V., Fomych M.I., Holiy O.V., Khomych A.V. Identification and classification of crop residues for further use. *Agricultural machinery*. 2021. No. 47. P. 95 - 101. *(The author conducted the analysis of experimental data on which the identification and classification features of plant biomass of agricultural crops were established)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.654>
3. Yageliuk S. V. Fomych M. I., Yageliuk O. O. Modern technologies for processing biomass of bast crops. *Agricultural machinery*. 2022. No. 48. P. 59 – 66. *(The author is responsible for data analysis and development of a scheme for the stages of processing flax from the hearth of various functional purposes)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.841>
4. Yageliuk S.V., Didukh V.F., Fomych M.I. Properties of biomass of stems of agricultural crops. *Tovaroznavny visnyk*. 2023. No. 16. P. 235 - 243. *(The author conducted a generalized analysis of the properties and quality indicators of biomass of stems of agricultural plants)* <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2023-17-19>
5. Yageliuk S.V., Fomych M.I. Classification of fuels from biomass of agricultural crops. 2024. *Agricultural machinery*. No. 50. P. 72-80. *(The author conducted the analysis of raw materials and fuels from biomass of agricultural crops as the basis for developing the classification)* <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1382>
6. Yageliuk S., Fomych M., Rechun O. Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*. 2024. №17(1). 134-145. *(The author analyzed of the dynamics of grain cultivation in the world)* <https://doi.org/10.62763/ef/1.2024.134>

Article in the publications included into Scopus databases:

7. Yaheliuk S., Didukh V., **Fomich M.**, Yaheliuk O., Kuzmina T., Boiko G. Optimization of technological parameters for fuel roll production using agricultural crop stem biomass. *Inmatch - Agricultural Engineering*. 2025. 75. 243-252. *(The author is responsible for the study of FRs density with different ratios of components using the method of mathematical experimental design)* <https://doi.org/10.35633/inmatch-75-21>

Abstracts, materials of scientific conferences:

8. Yageliuk S. V., Fomych M. I. Review of modern hemp and oilseed flax processing lines: abstracts of reports of the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Quality and Safety of Goods" (Lutsk, May 13, 2022) / Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2022. - P. 161-162. (The author owns the review of modern oilseed flax processing lines).

9. Fomych M. I. New plant energy sources in the context of the reconstruction of Ukraine: abstracts of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor Rybak Tymofiy Ivanovich and the 60th anniversary of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery (September 29-30, 2022). - Ternopil: Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, 2022. - P. 83-84.

10. Fomych M. I. The possibility of producing building materials from agricultural plant waste: materials of the International Scientific and Practical Conference "Youth Science for Peace and Development" (Chernivtsi, November 9-11, 2022) / Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. - Chernivtsi, 2022. - P. 595-597.

11. Fomych M. I. Modern regulatory framework for assessing the quality of solid fuel from agricultural plant residues: materials of the VII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Quality and Safety of Goods" (Lutsk, April 28, 2023). Lutsk National Technical University, - Lutsk, 2023. - P. 81-82.

12. Fomych M. I. Equipment and technologies for the production of fuel materials from plant biomass: materials of the IX International Scientific and Practical

Conference "Innovative Technologies in Agriculture" (Lutsk, June 7-8, 2023) / Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2023. - P. 180–181.

13. Yaheliuk S., Diduh V., Yaheliuk O., Fomych M. "Modern Trends in the Agricultural Higher Education" (Chişinău, Moldova, October 5–6, 2023). - Chişinău, Moldova, 2023. - P. 151–151 (The author is the author of the study of the rational parameters of the variable-volume pressing chamber).

14. Fomych M. I. Current status of electricity production from non-traditional fuels: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Quality and Safety of Goods" (Lutsk, April 5, 2024) / Lutsk National Technical University. – Lutsk, 2024. – P. 161–163.

15. Fomych M. I. Properties of flax seeds: materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists "Innovative and Resource-Saving Technologies of Food and Processing Industries and Restaurant Management" (Lutsk, April 24, 2024) / Lutsk National Technical University. – Lutsk, 2024. – P. 71.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ
ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ**

Біомаса стебел сільськогосподарських культур – БССК

Діоксид вуглецю, вуглекислий газ – CO₂

Камера пресування змінного об'єму – КПЗО

Компактні паливні рулони – ПР

Мільйонна частка відсотку, одиниця вимірювання концентрації та інших відносних величин – ppm

Монооксид вуглецю, чадний газ – CO

Паливні брикети – ПБ

Позначення для оксидів азоту NO та NO₂. Основним компонентом є NO, який згодом окислюється до NO₂. Поглинає видиме випромінювання в діапазоні 400 нм. – NO_x.

ЗМІСТ

| | |
|--|-------|
| ВСТУП..... | 28 |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 34 |
| 1.1 Тенденції розвитку виробництва колосових зернових та технічних культур | 34 |
| 1.2 Види та властивості залишків (стебел) сільськогосподарських культур | 42 |
| 1.3 Напрями використання біомаси стебел сільськогосподарських культур. | 49 |
| 1.4 Види палива із біомаси стебел сільськогосподарських культур | 51 |
| 1.5 Аналіз конструкції машин для збирання та обробки біомаси стебел сільськогосподарських культур..... | 54 |
| 1.6 Висновки, мета та задачі дослідження | 64 |
| РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБУ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ БІОМАСИ СТЕБЕЛ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР | 67 |
| 2.1 Програма досліджень | |
| 2.2 Обґрунтування класифікації залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, видів палива та машин для їх оброблення | 69 |
| 2.3 Обґрунтування параметрів паливних рулонів та вихідних даних для розрахунку пресувальної камери..... | 73 |
| 2.4 Аналіз роботи камери пресування | 75 |
| 2.5 Залежність частоти обертання компактного паливного рулону від його діаметра під час формування | 96 |
| 2.6 Пропозиції вдосконалення засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур та способу збирання..... | 98 |
| Висновки до розділу 2 | 101 |
| РОЗДІЛ 3 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 103 |
| 3.1 Експериментальне устаткування для проведення досліджень | 103 |

| | | |
|-----|--|------------|
| 3.2 | Методика визначення вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур, паливних рулонів та паливних брикетів | 109 |
| 3.3 | Методика дослідження впливу пружних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур на процес їх відновлення..... | 112 |
| 3.4 | Методика визначення зусилля подрібнення стебел сільськогосподарських рослин | 112 |
| 3.5 | Методика визначення щільності компактних паливних рулонів виготовлених у камері змінного об'єму методом математичного планування експерименту | 114 |
| 3.6 | Методика виготовлення паливних брикетів для дослідження продуктів їх згорання..... | 116 |
| 3.7 | Методика дослідження продуктів згорання паливних брикетів різного складу в лабораторних умовах | 118 |
| 3.8 | Методика дослідження показників якості та екологічності компактних паливних рулонів у виробничих умовах..... | 121 |
| 3.9 | Методика комплексного оцінювання якості компактних паливних рулонів | 123 |
| | Висновки до розділу 3 | 126 |
| | РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ | 127 |
| 4.1 | Характеристика досліджуваних зразків біомаси стебел сільськогосподарських культур, компактних паливних рулонів, паливних брикетів | 127 |
| 4.2 | Результати досліджень вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур та компактних паливних рулонів | 131 |
| 4.3 | Результати дослідження впливу пружних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур на їх відновлення..... | 135 |
| 4.4 | Зусилля подрібнення біомаси стебел колосових культур та льону..... | 137 |
| 4.5 | Результати дослідження щільності компактних паливних рулонів виготовлених у камері змінного об'єму методом математичного планування експерименту | 141 |

| | |
|--|-----|
| 4.6 Результати дослідження продуктів згоряння паливних брикетів різного складу в лабораторних умовах..... | 148 |
| 4.7 Результати дослідження показників якості та екологічності компактних паливних рулонів у виробничих умовах..... | 151 |
| Висновки до розділу 4 | 154 |
| РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ НОВОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ | 157 |
| 5.1 Оцінка якості паливних матеріалів..... | 157 |
| 5.2 Розрахунок економічної ефективності використання компактних паливних рулонів..... | 159 |
| Висновки до розділу 5..... | 162 |
| ВИСНОВКИ..... | 163 |
| РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ | 166 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 168 |
| ДОДАТКИ..... | 179 |

ВСТУП

Актуальність. В Україні та світі після збирання врожаю колосових зернових (пшениці, жита, ячменю) та технічних культур (льону олійного, льону-довгунця) на полях залишається велика кількість біомаси стебел сільськогосподарських культур, що призводить до значних втрат ресурсів і погіршення екологічної ситуації через неконтрольоване їх спалювання. Залишки стеблової біомаси мають високий потенціал для використання у виробництві різної продукції, зокрема твердого палива. Одним з перспективних напрямів раціонального використання біомаси стебел сільськогосподарських культур є виробництво твердого біопалива у вигляді паливних рулонів та паливних брикетів. Це сприяє зменшенню залежності вітчизняної енергетики від викопного палива, підвищенню ефективності використання врожаю та екологічної безпеки.

Однак наявні засоби та методи збирання й оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур мають низку недоліків: значні втрати під час збирання та оброблення, неможливість формування рулонів малого розміру, відсутність селективного підходу до збирання й використання біомаси стебел сільськогосподарських культур. Також недостатньо досліджені її фізико-механічні властивості, що впливають на ефективність процесу оброблення.

Отже, є необхідність в удосконаленні засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року; науково-дослідних робіт, що здійснювались у Луцькому національному технічному університеті, а саме, за темою: «Рециклінгові технології збирання та первинної переробки біомаси олійних культур» за кошти державного бюджету (№0121U109763) та темою «Аспекти забезпечення якості (Quality Assurance) та екологічності продукції на Волині (№0122U000921).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення якості ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур у компактні паливні

рулони шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи засобу оброблення та вдосконалення способу збирання біомаси.

Для досягнення даної мети необхідно виконати такі *задачі* дослідження:

- розробити класифікацію залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, видів твердого біопалива з них та засобів для їх оброблення;

- вдосконалити спосіб збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур;

- обґрунтувати параметри пресувальної камери змінного об'єму та дослідження взаємодії підпружинених роликів з біомасою стебел сільськогосподарських культур під час формування компактних паливних рулонів;

- поглибити дослідження фізико-механічних властивостей стебел льону, колосових зернових культур та їх подрібненої маси;

- розробити математичну модель процесу ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур для визначення раціональних параметрів формування компактних паливних рулонів у пресувальній камері змінного об'єму;

- дослідити якісний та кількісний склад викидів димових газів під час спалювання нового твердого біопалива;

- визначити комплексний показник якості компактних паливних рулонів та економічний ефект впровадження розробленої камери змінного об'єму для формування компактних паливних рулонів.

Об'єкт дослідження – спосіб збирання, процес формування компактних паливних рулонів та робочі органи обладнання для ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур.

Предмет дослідження – вплив конструктивних і технологічних параметрів процесу та засобів ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур на якості формування компактних паливних рулонів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження процесу формування компактних паливних рулонів проводилися шляхом математичного моделювання впливу конструктивних параметрів пресувальної камери змінного об'єму на рівномірність ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур та щільність рулонів із використанням законів механіки суцільного середовища, теорії

пружності та механіки матеріалів. Випробування проводилися на експериментальній пресувальній камері змінного об'єму, що дозволяло варіювати жорсткість пружин, нормальні сили притискання роликів та інші параметри процесу формування компактних паливних рулонів. Залежність щільності від режимів пресування (тиск, об'єм подачі, склад сировини) досліджували методом математичного планування три факторного експерименту. Оброблення експериментального масиву даних виконували із застосуванням комп'ютерних програм: MathCAD–2015, Design–Expert, Microsoft Office Excel 2016, AutoCad.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі проведених досліджень обґрунтовано раціональні параметри пресувальної камери змінного об'єму для формування паливних рулонів із біомаси стебел льону та колосових зернових, визначено вплив тиску ущільнення та вмісту стебел льону в біомасі на щільність паливних рулонів, а також встановлено якісні характеристики та екологічні показники використання отриманого біопалива. Як наслідком:

– *вперше* розроблено математичну модель, що описує процес регулювання ущільнення біомаси стебел із різним пропорційним вмістом льону та колосових зернових у пресувальній камері змінного об'єму шляхом зміни режимів пресування, що дозволяє прогнозувати якісні характеристики готових паливних рулонів.

– *вперше* запропоновано спосіб збирання, який забезпечує можливість часткового біологічного саморозкладу стеблових компонентів сільськогосподарських культур.

– *вперше* досліджено вплив пропорційного співвідношення біомаси льону та колосових зернових у складі твердого палива на ефективність згоряння та екологічні показники викидів.

Вдосконалено конструкцію пресувальної камери змінного об'єму шляхом оптимізації параметрів пружин стиску та роликів на основі трьох фаз формування, що сприяє досягненню більшої щільності та структурної стабільності компактних паливних рулонів.

Подальшого розвитку набуло дослідження впливу механічних характеристик стебел льону та колосових зернових на процес їх подрібнення, що дає змогу раціонально обирати параметри обладнання для оброблення біомаси.

Практичне значення одержаних результатів. На основі результатів проведених досліджень запропоновано вдосконалену конструкцію пресувальної камери змінного об'єму, що забезпечує стабільне ущільнення паливних рулонів, підвищену ефективність пресування та рівномірний розподіл щільності рулону.

За результатами проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування запропонованої камери змінного об'єму дозволяє підвищити ефективність використання біомаси стебел сільськогосподарських культур, знизити втрати рослинної сировини під час виробництва сільськогосподарських культур, а також забезпечити регульовану щільність паливних рулонів.

Запропонований спосіб збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур із використанням підбирача–подрібнювача з розгалужувальним пристроєм сприяє збереженню органічної маси в полі, що зменшує витрати на добрива та покращує екологічний стан ґрунтів.

Практичне значення підтверджується актами та довідкою про виробничі випробування науково–дослідних робіт державним комунальним підприємством «Луцьктепло», фермерським господарством «АГРОТРЕЙД–ПСС»., Володимир–Волинським ЦПО.

Результати дисертаційного дослідження використані в навчальному процесі Луцького національного технічного університету під час вивчення дисциплін «Проектування машин та обладнання галузі», «Конструювання машин», «Дослідження процесів і технологічних машин», «Експертиза якості та безпечності харчових продуктів», «Нормативна база для досліджень у галузевому машинобудуванні» та Володимир–Волинському центрі професійної освіти під час вивчення дисциплін «Будова, технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки», «Біологія та екологія», «Основи енергоефективності», «Обробка та зберігання сільськогосподарської продукції», «Основи землеробства», «Основи галузевої економіки та підприємництва», «Агротехнології».

Особистий внесок здобувача. Здобувач особисто брав участь у проведенні експериментальних досліджень, використовуючи методи визначення фізико–

механічних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур, процесів ущільнення та формування компактних паливних рулонів. Виконував підготовку та формування зразків, проводив випробування параметрів ущільнення у пресувальній камері змінного об'єму, аналізував вплив складу біомаси на якість паливних рулонів та паливних брикетів, виконував теоретичні розрахунки й визначав похибки вимірювань.

Самостійно здійснював аналіз отриманих експериментальних даних, встановлював залежності між параметрами ущільнення та щільністю паливних рулонів. Брав участь у розробці математичних моделей ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур та конструктивного вдосконалення пресувальної камери змінного об'єму. Спільно з науковим керівником визначав завдання дослідження, обґрунтовував наукову новизну та формулював загальні висновки дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було представлено, обговорено та схвалено на:

- VI-й міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Якість та безпечність товарів», м. Луцьк, 2022 р.

- Міжнародній науковій конференції присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, м. Тернопіль, 2022 р.

- Міжнародній науково-практичній конференції «Молодіжна наука заради миру та розвитку», м. Чернівці, 2022.

- VII-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Якість та безпечність товарів», м. Луцьк, 2023 р.

- IX-й Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК», м. Луцьк, 2023.

- Міжнародній науковій конференції «Сучасні тенденції розвитку аграрної вищої освіти», присвяченої 90-річчю з дня заснування вищої сільськогосподарської освіти в Республіці Молдова, Республіка Молдова, 2023 р.

- VIII-й Міжнародній науково–практичній конференції молодих учених та студентів «Якість та безпечність товарів», м. Луцьк, 2024 р.

- Всеукраїнській науково–практичній інтернет–конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових і переробних виробництв та ресторанного господарства» м. Луцьк, 2024 р.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладено в 15 публікаціях, у тому числі статей у фахових виданнях України – 6, статей у наукових виданнях, що входять до наукометричних баз «Scopus» – 1, тез доповідей на конференціях – 8.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій, загальної характеристики роботи, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації викладено на 191 сторінках машинописного тексту, вона містить 55 рисунків, 31 таблиць та 10 додатків на 12 сторінках. Список використаних джерел охоплює 110 найменувань

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Тенденції розвитку виробництва колосових зернових та технічних культур

1.1.1 Сучасний стан світового ринку колосових зернових та технічних культур. В Україні та у світі з кожним роком збільшуються площі під вирощування сільськогосподарських культур. Це зумовлено удосконаленням сортів насіння, технологій зрошення та внесення добрив, що дозволяє отримувати велику врожайність. Як наслідок, виникає проблема утилізації залишків стебел сільськогосподарських культур.

Пшениця є однією з найбільш широко вирощуваних колосових зернових культур у всьому світі. Вона багата вуглеводами (в основному крохмалем), білком (глютенном), вітамінами групи В, харчовими волокнами і мінеральними речовинами (залізом, магнієм) [1]. Пшеницю вирощують у широкому діапазоні кліматичних умов з використанням різних методів, включаючи традиційний обробіток ґрунту та точне землеробство. Згідно з даними, наведеними на графіку (рис. 1.1) та у табл. 1.1 встановлено, що Індія, Китай, США, Канада та Україна мають найбільші площі та виробництво пшениці у світі [2, 3].

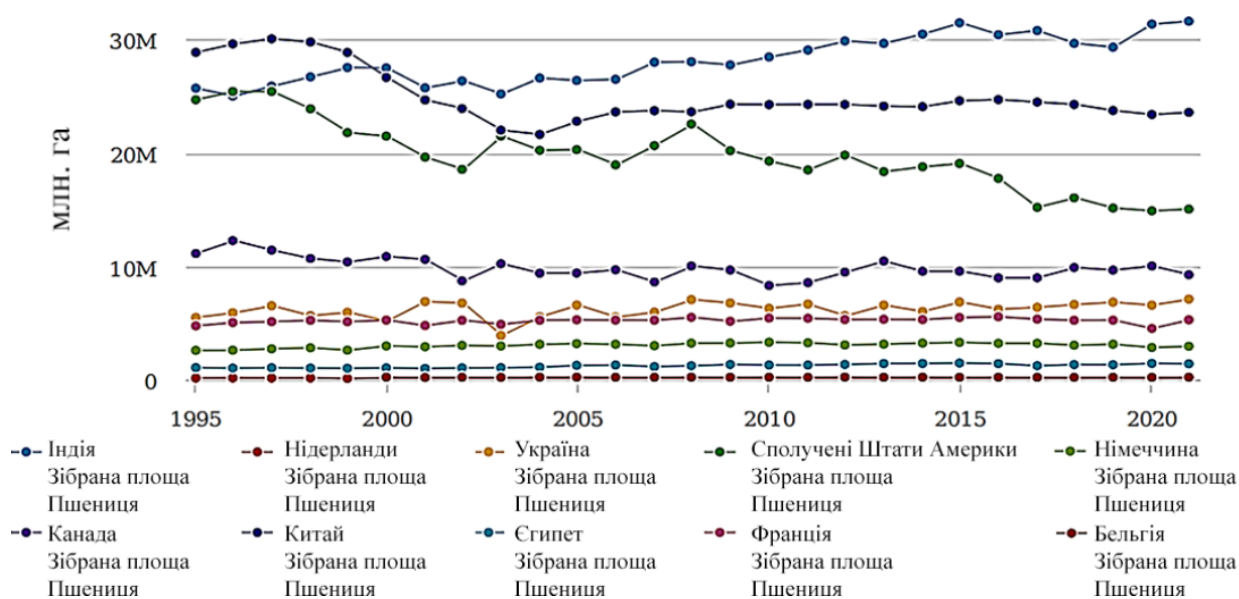


Рисунок 1.1 – Площа вирощування пшениці (млн. га) [2, 3]

Індія нарощує виробництво пшениці, про що свідчить розширення площі вирощування (31 610 00 га) у 2021 році порівняно з попередніми роками. Це свідчить про позитивну динаміку у вирощуванні пшениці в країні. Площа вирощування пшениці в Китаї у 2021 році становила 23 571 400 гектарів. США мають значні площі вирощування пшениці (15 039 490 га), але дані свідчать про скорочення площ посівів пшениці в 2012–2021 роках. Це може бути пов'язано з різними факторами, включаючи зміни в сільськогосподарській практиці або зміни в вимогах ринку.

Таблиця 1.1 – Площа вирощування пшениці у світі (га) [2, 3]

| Країна | Рік | | | | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 2000 | 2004 | 2007 | 2009 | 2012 | 2015 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
| Китай | 26653326 | 21626074 | 23721070 | 24291081 | 24270311 | 24599116 | 24480542 | 24268721 | 23732560 | 23383000 | 23571400 |
| Індія | 26344700 | 26594700 | 27994500 | 27752400 | 29860000 | 31470000 | 30785230 | 29650590 | 29318780 | 31357020 | 31610000 |
| США | 21474064 | 20221956 | 20638784 | 20191200 | 19797644 | 19058470 | 15198130 | 16030580 | 15132980 | 14888140 | 15039490 |
| Франція | 5248436 | 5237005 | 5238602 | 5147394 | 5297826 | 5480208 | 5332084 | 5234090 | 5244250 | 4512420 | 5276730 |
| Україна | 5161600 | 5533700 | 5951300 | 6752900 | 5629700 | 6839500 | 6377400 | 6619600 | 6825300 | 6564500 | 7099400 |
| Канада | 10854800 | 9388900 | 8616100 | 9660400 | 9479100 | 9558300 | 8983300 | 9880800 | 9655800 | 10017800 | 9247000 |
| Бельгія | 213100 | 213035 | 199897 | 201768 | 217060 | 201628 | 197592 | 195690 | 203760 | 194660 | 209180 |
| Єгипет | 1034985 | 1094741 | 1140979 | 1335295 | 1336234 | 1457506 | 1227611 | 1326401 | 1316678 | 1429684 | 1394558 |
| Нідерланди | 136700 | 137287 | 140000 | 150888 | 151625 | 142468 | 115923 | 111660 | 120550 | 108910 | 118140 |
| Німеччина | 2968940 | 3111651 | 2992075 | 3226036 | 3056700 | 3282700 | 3202600 | 3036300 | 3118100 | 2835500 | 2939000 |

Подібно до США, Канада скорочує площі посівів пшениці. На цю тенденцію можуть впливати зміни у землекористуванні, сівозміні чи динаміці ринку. Дані показують, що в Україні зберігаються значні площі посівів пшениці. Хоча абсолютні цифри нижчі, ніж у деяких інших країнах, Україна залишається важливим гравцем у світовому виробництві пшениці. Збільшення площ під пшеницю в Індії узгоджується із зусиллями країни щодо покращення продовольчої безпеки та задоволення підвищеного попиту на пшеницю.

Льон є важливою культурою, яку культивують заради насіння (насіння льону) і волокна. Насіння льону використовують у їжу, оскільки воно має поживні властивості, зокрема високий вміст Омега–3 жирних кислот, лігніну, харчових волокон, білка, вітамінів (вітамінів групи В) і мінералів, інших речовин (марганець, магній) [3]. Волокна льону використовуються в текстилі та різних промислових цілях [5, 6].

Загальна кількість льону, вирощеного у всьому світі, у 2021 році становила 333 914 518 тонн. За даними 2021 року (табл. 1.2) у Канаді посіяно 403 500 га, Китаї – 260 000 га; Індії – 183 725 га, США – 10 846 га.

Таблиця 1.2 – Площа вирощування льону у світі (га) [2, 3]

| Країна | Рік | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2000 | 2004 | 2007 | 2009 | 2012 | 2015 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
| Китай | 497870 | 500000 | 339900 | 336930 | 317860 | 292310 | 284000 | 279000 | 260000 | 250000 | 260000 |
| Індія | 593100 | 476500 | 426000 | 407900 | 323000 | 285000 | 325220 | 326180 | 172710 | 179900 | 183725 |
| США | 209220 | 206800 | 141240 | 127070 | 135980 | 184540 | 110080 | 80130 | 114930 | 119790 | 10846 |
| Франція | 16239 | 6172 | 17030 | 9633 | 12077 | 22308 | 29116 | 24760 | 21840 | 32070 | 37500 |
| Україна | 20000 | 14000 | 24100 | 46800 | 52900 | 66700 | 47500 | 31800 | 16900 | 14000 | 27600 |
| Канада | 590900 | 518000 | 524000 | 623300 | 358200 | 626900 | 418900 | 341800 | 339300 | 371300 | 403500 |
| Бельгія | 13700 | 20529 | 14297 | 11227 | 10581 | 12000 | 15000 | 90 | 60 | 110 | 130 |
| Єгипет | 16000 | 17138 | 16000 | 5369 | 4276 | 3128 | 6000 | 5000 | 5000 | 5000 | 6000 |
| Нідерланди | 4400 | 4485 | 3500 | 2163 | 2077 | 2405 | 2494 | – | – | – | 1800 |
| Німеччина | 102500 | 12900 | 6300 | 4100 | 4200 | 5000 | 4600 | 3800 | 3400 | 3900 | 5200 |

З графіка (рис. 1.2) видно, що в Україні з 1995 по 2019 рік спостерігалось скорочення посівів льону, але в наступні роки площі під льон збільшувалися. Глобальне збільшення площ вирощування льону в 2020–2021 роках свідчить про потенційну зміну або відродження інтересу до льону як культури. Канада залишається основним лідером у світовому вирощуванні льону, займаючи значну частку від загальної посівної площі.

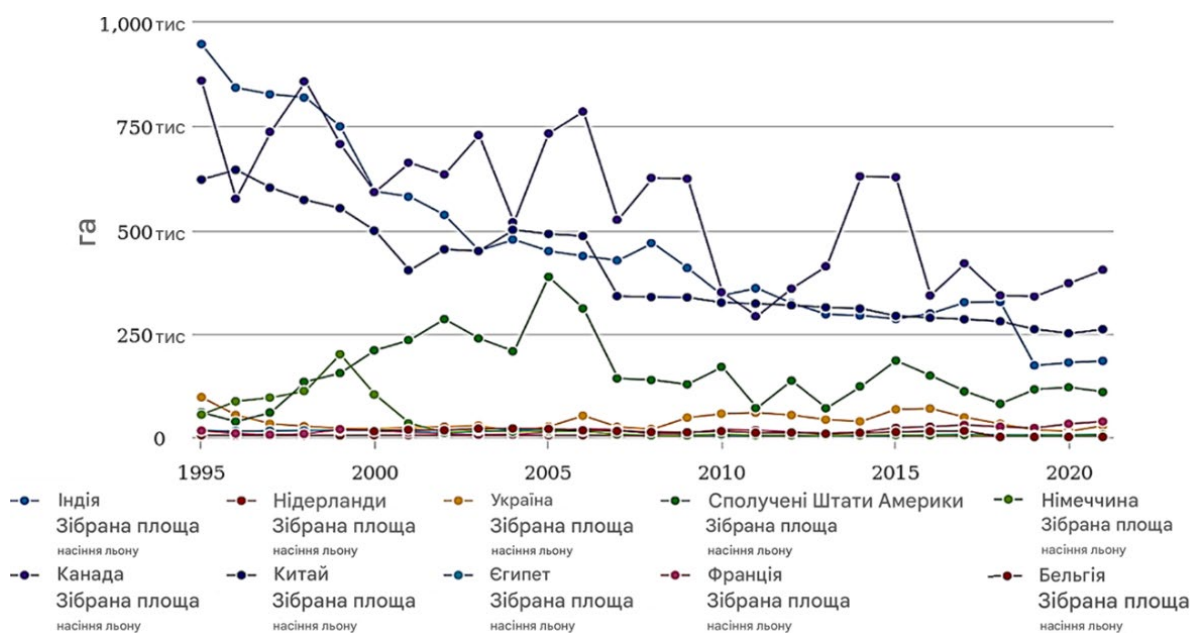


Рисунок 1.2 – Площа вирощування льону у світі (га) [2, 3]

На економічну доцільність вирощування льону впливають такі фактори, як ціни на сировину та тенденції світового ринку сільськогосподарських культур. Прогрес у сортах льону, практиці вирощування та технологіях переробки міг вплинути на те, щоб виробники сільськогосподарської продукції переглянули льон як економічно доцільну культуру.

За результатами проведених досліджень створено діаграму посівних площ пшениці, льону у світі (рис. 1.3). Аналізуючи діаграму посівних площ, можна зробити висновок, що посівні площі для вирощування різних сільськогосподарських культур, таких як пшениці, льону постійно зростають.

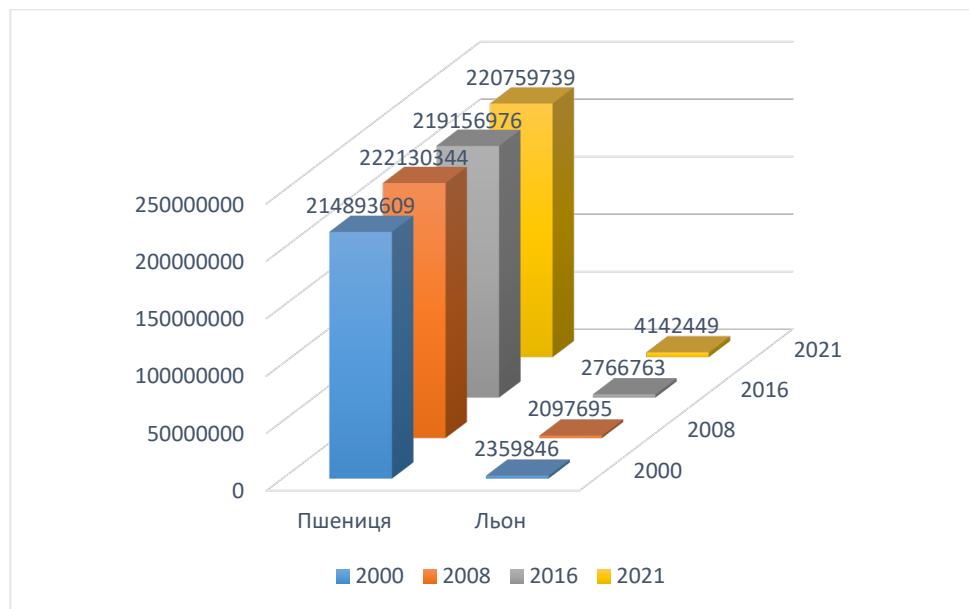


Рисунок 1.3 – Діаграма посівних площ пшениці, льону у світі (га)

Загалом, діаграма, що зображує зростання площ вирощування, демонструє, що пшениця залишається стабільною культурою, виробництво якої протягом останніх років поступово збільшується. Найбільше її посівів було у 2008 році – 222 130 344 га. Ситуація з льоном дещо інша: після скорочення посівних площ у період з 2000 по 2016 роках, посіви почали збільшуватися, а саме з 2 766 763 га у 2016 році до 4 142 449 га у 2021 році.

Виробництво пшениці залишається стабільним і відображає тенденції, що формують світове сільське господарство, підкреслюючи важливість цих культур

для задоволення різноманітних потреб.

Враховуючи, що з кожним роком збільшуються посівні площі пшениці та льону, можна передбачити зростання проблем з утилізацією біомаси стебел сільськогосподарських культур біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК). Тому для подальших досліджень потрібно знати особливості вирощування колосових зернових та технічних культур, а саме пшениці та льону.

1.1.2. Особливості вирощування. Колосові зернові культури. Колосові зернові культури за характером вирощування, морфологічними ознаками й біологічними особливостями поділяють на дві групи:

- хлібні злаки першої групи (пшениця, жито, тритикале, ячмінь, овес) холодостійкі, вологолюбні, мають озимі й ярі форми, швидко ростуть на початку вегетації, є рослинами довгого дня, їхнє зерно має поздовжню борозенку й проростає кількома корінцями;

- хлібні злаки другої групи (просо, сорго, кукурудза) належать до рослин короткого дня, теплолюбні, повільно ростуть на початку вегетації, їхнє зерно без борозенки, проростає одним корінцем. До цієї групи також відносять гречку.

Суцвіття: колос (пшениця, жито, ячмінь, тритикале), волоть (овес, просо, рис, сорго), китиця (гречка). Колос складається з колосків, розміщених на стрижні.

Стебло злаків – соломину, поділена вузлами на міжвузля. Соломина порожниста, у кукурудзи, проса й сорго – з пухкою серцевиною. Висота стебла залежить від сорту й умов вирощування: 0,5 м – 2 м (злаки), 1,5–4 м (кукурудза, сорго).

Колосок має дві луски та квітку: у пшениці й жита – по одному, у ячменю – по три [6]. Колоски бувають одноквіткові (ячмінь, сорго, просо), двоквіткові (кукурудза, жито), багатоквіткові (пшениця, овес) [8, 9].

Стиглість пшениці озимої починається з формування оболонки зернівки. Ріст інших частин рослини практично зупиняється, поживні речовини надходять тільки до зерна. Після цього розпочинаються по черзі три види стиглості:

- молочна – настає через 12–16 днів; зернівка зелена і дуже волога (40–

60%) проте вже повно–розмірна;

- воскова – вологість пшениці знижується до 40–20%; зерно ще не повністю тверде, в цій стадії можливо застосовувати роздільний спосіб збирання;

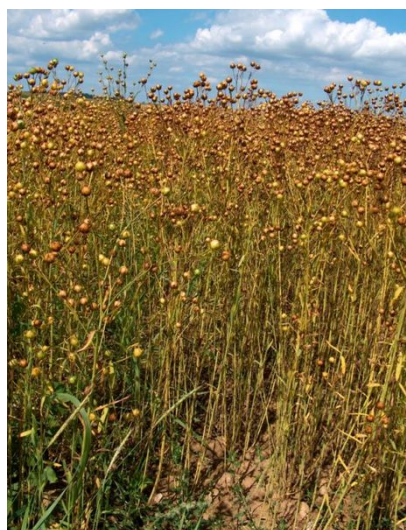
- повна – вологість зерна зменшується до 14–20%, зернівка стає достатньо твердою та починає обсипатися; прибирання пшениці проводиться прямим комбайнуванням.

Пшениця є вимогливою культурою і потребує ретельного догляду. Кожному етапу розвитку властиві особливості, за якими потрібно стежити і коригувати для отримання якісного врожаю [7].

1.1.3 Особливості вирощування. Технічні культури. Льон. Льон олійний (рис. 1.4 а) більш вибагливий до тепла, ніж льон–довгунець (рис.1.4, б). Насіння починає проростати за температури 3–5°C, а сходи з'являються за температури повітря 6°C. Також сходи льону олійного витримують весняні заморозки до міну 3–4°C, а рослини двотижневого віку – навіть до мінус 6°C. Проте культура вимоглива до тепла під час дозрівання (20–22°C). Тривалість вегетаційного періоду становить 70–115 днів.



а



б

Рисунок 1.4 – Льон у Волинській області: а – льон олійний; б – льон–довгунець

Льон олійний переважно збирається комбайновим способом, цей спосіб збирання не передбачає використання стеблової частини, висота якої не перевищує

45–50 см. Через відсутність спеціалізованих машин для збирання цієї культури відбуваються значної втрати стеблової частини врожаю, а саме: значно пошкоджується стеблова частина, що в подальшому унеможливорює виділення з неї волокна; пошкодження та втрата насіння; стебла, що залишаються в полі негативно впливають на подальше використання ґрунту. Також намотування волокон льону на робочі органи комбайнів спричиняє їх зупинення та необхідність ремонту, в цьому випадку використовують сучасні зернозбиральні комбайни з роторно–сепаруючою системою, на яких щороку необхідно встановлювати нові, оригінальні різальні апарати.

Збирання врожаю розпочинають у фазі ранньої жовтої стиглості культури, попередньо обробивши її десикантами. Більш пізні терміни унеможливають збирання зернозбиральним комбайном з сегментно–пальцевим різальним апаратом. Наявність довгого стебла, інколи більше 100 см спричинило необхідність апробування роздільного збирання. Це в свою чергу передбачає скошування льону олійного та формування валків, а вже обмолочені валки легко формуються у рулони. Проте за цього способу збирання втрачається значна кількість врожаю насіння [9, 10].

Стебла колосових зернових та льону мають подібні морфологічні характеристики, відповідно можуть бути використані як сировина для подальшого оброблення в різному співвідношенні для виробництва товарів різного функціонального призначення.

Льон–довгунець. Період досягання льону–довгунця характеризується чотирма фазами стиглості:

а) “зелена” – насінневі коробочки повністю сформовані, їхній колір – зелений, 25–35% усіх коробочок мають насіння недостатньо виповнене;

б) “рання жовта” – насіння добре сформоване, у 65–75% жовто–зелених насінневих коробочок воно блідо–зелене з жовтим носиком. Решта насінневих коробочок жовтого кольору з жовтим насінням. Лише невелика кількість насінневих коробочок зеленого кольору з зеленим насінням та бурі з коричневими. У цій фазі збирання врожаю отримують найвищий урожай волокна;

в) “жовта” – 50% насінневих коробочок мають жовте насіння, інші 50% – жовто–зелені і бурі. У цій фазі збирають льон насінницьких посівів;

г) “повна” всі коробочки на рослинах бурі і сухі. Насіння коричневе і сухе. Допускати льон на пні до повної фази стиглості не можна.

Льон–довгунець на сьогодні збирається декількома способами. Усі вони можуть бути з розстелянням стебел на льонищі, механізованим в’язанням стебел в снопи або пресуванням стебел в рулони. Традиційно існував сноповий спосіб. Але механізоване в’язання снопів не знайшло відповідного застосування через труднощі з освоєнням в’язальних апаратів. І він на сьогодні не використовується. Проте комбайнова та роздільна технології збирання використовуються.

Комбайновий спосіб містить операції брання льону з одночасним обчісуванням насінневих коробочок і розстеленням соломи у стрічку на льонищі, сушіння і перероблення вороху, піднімання трести. При роботі льонокомбайнів врозстил можливі два варіанти збирання: з реалізацією продукції льоносоломою і трестю. В обох варіантах висушені снопи відвозяться безпосередньо на льонозавод. При цьому способі збирання затрати праці скорочуються в 2–3 рази порівняно з сноповим способом збирання.

Роздільний спосіб: вибраний льон розстиляють на льонищі тонкою стрічкою для просушування і дозрівання насіння. Пізніше її обмолочують, а соломку знову розстеляють на льонищі для одержання трести або в’яжуть у снопи для здачі на льонозавод. Підбирання трести з стрічок проводять так само, як і при комбайновому способі збирання. Ворох вивозять з поля до пунктів сушіння та обмолоту, де за необхідності досушують, далі обробляють, і з нього виділяється насіння льону. При сухій погоді льон в стрічках висихає за 5–6 днів. Роздільний спосіб, як і комбайновий, менш трудомісткий, однак залежить від погодних умов. Основна причина обмеженого застосування роздільної технології збирання – це відсутність відповідного комплексу машин [11, 12].

Незалежно від виду й сорту, якщо довжина жмені стебел менша за 50 см, можливе збирання лише на насіння, з стеблової частини – найбільш доцільно обробляти та виготовляти тверді паливні матеріали [12, 13].

Спільним для колосових зернових та льону є те, що за збирання врожаю зерна залишаються рештки – стебла сільськогосподарських культур, які доцільно у подальшому переробляти на тверде паливо. Для цього потрібно проаналізувати види та характеристики залишків сільськогосподарських культур.

1.2 Види та властивості залишків (стебел) сільськогосподарських культур

Згідно з даними FAOSTAT [2], приблизно 400 мільйонів тонн стебел сільськогосподарських рослин щорічно спалюється у світі. Це спричиняє викиди шкідливих речовин, таких як: тверді частинки (сажа), оксиди азоту, різні канцерогени та чадний газ, що значною мірою сприяє забрудненню повітря та погіршенню поверхневого озонового шару. Ці негативні фактори посилюють глобальні зміни клімату. Це було детально вивчено дослідниками Lan R. та ін. Amann, M. та ін. [14, 15]. Щоб пом'якшити негативні наслідки Gatkal N. R., Nalawade S. M., Sahni Ramesh K., Кашицький В.П., Садова О.Л., Янчук С.Л. [16, 17] пропонують ефективні методи утилізації сільськогосподарських залишків.

Сучасним агропромисловим виробництвом в Україні не передбачається оброблення стеблової частини біомаси (залишків) сільськогосподарських культур. Відповідно до даних «Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів» [18] в Україні у 2020 році було ідентифіковано та описано відходи сільськогосподарських культур [19].

На основі проведених досліджень, що проводились на дослідних ділянках Луцького національного технічного університету, ДПЕГ «Еліта» Волинської ДСГСДС ІК НААН (сmt. Рокині), АГРОТРЕЙД–ПСС (сmt. Локачі), протягом 2021–2023 років у межах науково–дослідної роботи за кошти державного бюджету на тему: «Рециклінгові технології збирання та первинної переробки біомаси олійних культур» [20] встановлено, що відходи сільськогосподарських культур можна класифікувати, як подано у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Відходи сільськогосподарських культур [18]

| Найменування відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів(ДК 005–06) | Код відходів | Обсяг утворених відходів, т |
|---|----------------------------|-----------------------------|
| Насіння злаків хлібних та культур сільськогосподарських, н. в. і у., зіпсоване (у т. ч. під час оброблення) | 0111.1.1.01 | 23967,1 |
| Відходи тканин рослинного походження | 0111.2.6.00 | 83834,5 |
| Солома колосових та інша | 0111.2.9.01 0111.2.9.02 | 588100,7 |
| Качани кукурудзи обрушені | 0111.2.9.03 | 1231,2 |
| Стебла кукурудзи сухі | 0111.2.9.04 | 602698,4 |
| Злаки хлібні некондиційні | 0111.3.1.01 | 28384,7 |
| Картопля некондиційна | 0111.3.1.02 | 187,4 |
| Культури бобові некондиційні | 0111.3.1.03 | 165,1 |
| Плоди, насіння олійних культур некондиційні | 0111.3.1.04 | 4798,6 |
| Буряк цукровий некондиційний | 0111.3.1.06 | 13826,6 |
| Солома та фураж некондиційні | 0111.3.1.07 | 3214,1 |
| Сировина рослинна (у т. ч. волокна луб'яні), яку використовують у текстильному виробництві, некондиційна | 0111.3.1.08 | 406,0 |
| Рослини (у т. ч. ефіроолійні), квіти тощо, які використовують головним чином у парфумерії, фармацевтиці або як інсектицидні, фунгіцидні чи аналогічні засоби, некондиційні | 0111.3.1.09 | 96,2 |
| Злаки хлібні, культури зернові інші забруднені радіонуклідами та (або) шкідливими (небезпечними) речовинами | 0111.3.2.01 | 628,9 |
| Культури сільськогосподарські інші (у т. ч. картопля, бобові, плоди та насіння олійні, тютюн та махорка, буряк цукровий, солома та фураж, рослини для текстильного виробництва, рослини для парфумерії та фармацевтики тощо), забруднені радіонуклідами | 0111.3.2.02 | |
| Бадилля овочево | 0112.2.9.01 | 257,9 |
| Залишки, які утворилися під час догляду за посадками овочів, квітів, саджанців | 0112.2.9.02 | 2288,7 |
| Коренеплоди та бульбоплоди некондиційні | 0112.3.1.01 | 72,0 |

Ця таблиця демонструє, що стебла сільськогосподарських культур утворюють основну масу відходів. Водночас обсяги утворених відходів вимагають розроблення комплексного підходу до утилізації та використання як вторинної сировини, що сприятиме екологічній безпеці та підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва.

На діаграмі (рис. 1.5) показана узагальнена якісна та кількісна характеристика рослинної біомаси, що залишається після збирання основного врожаю сільськогосподарських культур.

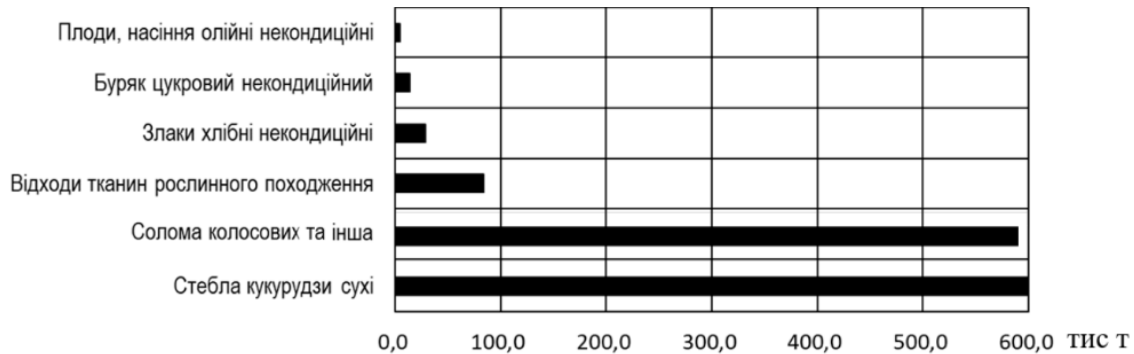


Рисунок 1.5 – Основні складові біомаси сільськогосподарських культур [18]

Відповідно до цих відомостей, можна зробити висновок, що наймасовішими та придатними до перероблення залишками є стебла соломи колосових та інших культур – 588 100,7 т. Аналізуючи дані таблиці (табл. 1.3) та діаграми (рис. 1.6) можна виокремити також луб'яні та олійні культури, які традиційно вирощувались на території Волинської області – 83834,5 т.

У процесі збирання льону олійного одержують насіння (основний продукт) та стеблову частину (побічний продукт, відходи). Насіння, за необхідності, підсушують та очищають. Стеблова біомаса льону залишається у валках на полі. Хоча згідно з наявними науковими дослідженнями [21], з трести льону олійного можна отримати неорієнтоване волокно, що може використовуватися в якості сировини для виробництва паперу, нетканих матеріалів та армування пластмас [22, 23]. Запропонована технологія збирання льону олійного з врахуванням фази стиглості та переробки стебел для подальшого вилежування у тресту або виготовлення паливних матеріалів з використанням зернозбирального комбайна удосконаленої конструкції. Також солому цієї культури використовують для одержання різних паливних матеріалів [24].

Дещо краща ситуація склалася із соломою злакових зернових культур. Розроблені та запроваджені механізми для подрібнення із подальшим

переорюванням рослинних залишків. Ці методи дозволяють використовувати рослинну біомасу в якості органічного добрива. Іншим напрямом є використання соломи як грубого корму у тваринництві [25]. Проте, дослідження показали, що цей напрям малоефективний. Також солому застосовують в енергетичних цілях як паливо [26].

Спільним для колосових зернових та льону є те, що традиційно тільки зерно або насіння переробляється для споживання, в той час як інша частина рослини, зокрема стебло, часто не використовується (відходи). За даними Державної служби статистики України (2021 р.), кількість відходів сільськогосподарських культур, що утворилися лише в Україні, становила 10 779 тисяч тонн, з яких 1 363 тисяч тонн – рослинні відходи сільськогосподарського виробництва, що потребують утилізування [19, 20]. Збільшення виробництва сільськогосподарських культур може сприяти екологічним проблемам, особливо коли утилізування сільськогосподарських відходів передбачає спалювання. Це спричиняє викиди у повітря різноманітних шкідливих речовин, зокрема твердих частинок, чадного газу, оксидів азоту та летких органічних сполук. Також спалювання рослинних залишків видаляє з ґрунту органічні речовини, що необхідні для його родючості. Баланс між потребою у збільшенні виробництва продуктів харчування та збереженням навколишнього середовища і соціальною відповідальністю є складним завданням, що вимагає цілісного та комплексного підходу на місцевому, національному та глобальному рівнях.

Біомаса стебел сільськогосподарських культур – це відходи, що залишаються в полі після збирання основного урожаю. Для різних сільськогосподарських культур можна знайти спільні властивості та показники якості, що їх характеризують. Під час збирання та оброблення стебел культур застосовується багато технологічних операцій. До них відносять брання, різання, сушіння, пресування, зминання тощо. Властивості стебел сільськогосподарських культур мають важливе значення для розроблення та удосконалення засобів для їх оброблення. Стебла, які залишаються у полі після збирання основного врожаю, мають спільні властивості, для полегшення їх подальшого оброблення потрібно

знати їх характеристики, а саме: довжину, вологість (після обмолоту), опір різанню, стисканню а також пружні властивості [28, 29, 30, 31, 32].

Визначенням властивостей паливних матеріалів сформованих з стебел льону олійного займались Дідух В.Ф., Тарасюк В.В., Оніщук В.С [33].

Ягелюк С.В., Дідух В. Ф. визначали вологість за допомогою спеціально розробленого пристосування, принцип дії якого заснований на вимірюванні електричного опору біомаси олійних луб'яних культур [34].

В науковій праці Цизь І.Є., Мельник О.О., Цизь Р.В. [35] висвітлені результати експериментальних досліджень властивостей стебел соломи пшениці під дією крутильних навантажень та вплив на ці властивості вологості стеблового матеріалу, результатом досліджень стало те, що зі збільшенням вологості матеріалу його здатність до деформування зростає і відбувається за менших зусиль.

Кирило В.Л. та Пришляк В.М. [36] досліджували механіко–технологічні властивості стебел, вплив агротехніки вирощування сільськогосподарських культур на характеристики міцності рослин, що в подальшому впливають на розрахунок та обґрунтування параметрів ріжучих робочих органів машин.

Дослідження властивостей стебел льону проводили багато вчених. Юхимчук С. М. та ін. [37], теоретично досліджували енергетику процесу брання стебел льону, які затискаються у прямолінійному поперечному бральному рівчаку та розташовані в різних місцях пучках. Толстушко М.М. та ін. [38], займались визначенням основних параметрів робочих органів пресувальної камери рулонного прес–підбирача. Хомич А.В., Дударев І.М. [39], досліджували роботу струшувача стрічки стебел льону. Дударев І.М. та ін. [40], теоретично досліджували процес брання льону конічно–дисківим льонобральним апаратом. Кузьміна Т.О. та ін. [41], досліджували товарознавчі властивості льоносировини для армування геотекстильних полотен.

Толстушко Н.О. та ін. визначали залежність тиску пресування снопа стеблової стрічки льонотрести від його щільності [42]. Юхимчук С.Ф. та ін. визначали брання стебел льону, які затискаються у прямолінійному поперечному

бральному рівчаку та розташовані в різних місцях пучка [43]. Хайліс Г.В., Ягелюк С.В., встановили закономірності поперечного стиску стебел льону та побудували діаграми залежності умовного напруження від відносної деформації. Деформації, що виникають під час дії робочих органів машин, розглянуті вченим Хайліс Г.В. і встановлено закономірності застосування для розрахунку процесів брання та параметрів бральних машин.

Визначення умов формування рулонів з рослинних сільськогосподарських матеріалів проводили Хайліс Г. А., Толстушко Н. А., Шейченко [44]. Проте умови формування паливного рулону (ПР) розміру без обв'язування, не розглядалися.

Вологість – одна з визначальних характеристик стебел льону, згідно з Ягелюк С. В. [10] для льону–довгунця визначають нормовану вологість соломи – 19% (до абсолютно сухої маси); якщо вологість перевищує 25 %, то таку сировину на перероблення не приймають. Вологість є важливим чинником, за яким визначають придатність БССК для збирання, оброблення та збереження.

На основі досліджень, а також аналізу стану світового та вітчизняного ринку льону можна стверджувати, що відродження льонівиробництва залежить від комплексного використання всіх складових льону олійного та льону–довгунця [11].

Вологість БССК залежить від погодних умов, в яких знаходиться. Одразу після збирання зернозбиральним комбайном біомаса стебел сільськогосподарських культур має вологість 15–20%. Блюм Я. Б. Гелетуха Г. Г., Григорюк І. П. [24]. Вважають, що вилежування на полі дозволяє не лише зменшити вологість до 14–17%, але й сприяє вимиванню хлору з стебел пшениці. Крім того, важливо, що для льону міцність волокна не зменшується, а збільшується на 40%. Різна вологість впливає і на інші фізико–механічні властивості, які настільки сильно змінюються, що їх не можна не враховувати при обробленні [28].

Різання – це одна з тих операцій оброблення, що найчастіше використовується. На неї мають вплив властивості рослинних матеріалів. Окремі з них досліджували багато вчених. У роботі [28] Ягелюк С. В., Дідух В. Ф., Голій, О.

В. визначили зусилля, що необхідне для різання окремих стебел і груп стебел льону–довгунця та льону олійного, проте не було проведено досліджень щодо інших сільськогосподарських культур. В роботах S. Julrat, S.Trabelsi, N. P. K. Nielsen, C. Felby, T. Poulsen, D. J. Gardner, В. Дідух, С. Ягелюк [31, 32, 33] досліджували вологість рослинних матеріалів з допомогою сучасних електричних методів, проте були розглянуті не усі сільськогосподарські культури. Також важливим показником БССК є щільність. Так, Nehru С., Alvin W. та ін. [34] визначали об'ємну щільність біомаси соломи пшениці та кукурудзи.

Ляліна Н. П., Кузьміна Т. О. та ін. [45, 46] займалися пошуком шляхів покращення виробничих умов перероблення лубоволокнистих рослин та розв'язання питань підвищення якісних і кількісних характеристик луб'яних волокон за рахунок поліпшення технологічних особливостей стеблового матеріалу і застосування конструкційних розробок вузлових з'єднань пристроїв з оброблення лубоволокнистої сировини, можливість використання рослинних матеріалів у будівництві та меблевій промисловості, порівняння властивостей новітніх будівельних матеріалів з наявними. Березовський Ю. В. Кузьміна Т. О., Ляліна Н. П. [47] вивчали вплив концентрації водних консервантів, вологості, тривалості зберігання на якість волокнистої продукції, отриманої в результаті оброблення стеблового матеріалу.

Стебла колосових зернових та льону як сировина для виготовлення паливних матеріалів мають спільні характеристики та властивості. Також варто зазначити, що досліджувались тільки стебла, а біомаса в загальному не розглядалась, тому потрібно враховувати інші частини рослин, їх суміші для отримання повнішої оцінки. Це дозволить забезпечити комплексний підхід до аналізу продуктивності та екологічної ролі рослин, а також оцінити їхній потенціал у різних галузях, наприклад, у виробництві біопалива. Для вирішення поставлених завдань потрібно визначити напрямки використання біомаси стебел сільськогосподарських культур для їх подальшого використання.

1.3 Напрями використання біомаси стебел сільськогосподарських культур

Важливим напрямом раціонального використання побічної продукції сільського господарства є її перероблення з метою отримання додаткової цінності у різних галузях, таких як тваринництво, біоенергетика та промисловість.

Біомасу стебел сільськогосподарських культур та залишки оброблення насіння можна використовувати для корму тваринам, компостування або виробництва біоенергії. Відходи зернових та олійних культур можуть бути перероблені або використані як сировина для інших видів промисловості, таких як корми для тварин або виробництво біопалива, що показано на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Залишки зернових і технічних культур та можливості їх переробки для отримання товарів різного функціонального призначення

Ще одним напрямом використання стебел льону, що дозволить швидко вирішити наявні проблеми і не потребує великих затрат, є виробництво паливних рулонів із стебел волокнистої маси льону. Досі таке виробництво було неможливим,

оскільки сучасні засоби формування рулонів із сільськогосподарських матеріалів можуть виготовляти лише рулони діаметром (до 3,5 м) та здебільшого потребують додаткового обв'язування [11, 23, 24]. Це ускладнює, а подекуди робить неможливим використання їх як палива для сучасних котлів. Розміри паливних отворів котлів є обмеженими (до 0,8 м).

У цьому дослідженні не були розглянуті стебла злакових зернових культур, оскільки їх є велика кількість, і вони можуть бути ефективно використані для виготовлення ПР із застосуванням льону як в'язучого шару. Такий підхід дозволить оптимізувати використання сировини та забезпечити більшу екологічність і рентабельність.

Серед найбільш ефективних рішень є оброблення рослинної біомаси на біопаливо [48, 49]. Викопне паливо є обмеженим енергетичним ресурсом, що з часом буде вичерпано. За останні кілька років важливість екологічно стійкого біопалива стає все більш очевидною. Біомаса стебел сільськогосподарських культур є потенційним відновлюваним джерелом енергії, що забезпечує помітний вміст енергії на одиницю маси, хоча й нижчий, ніж у викопного палива [50]. Його використання як стійкої альтернативи енергії викликає все більшу зацікавленість у дослідників [51, 52].

Тверде біопаливо не лише вирішує проблему утилізації сільськогосподарських відходів, але й служить екологічно чистим джерелом енергії. Особливо економічним і простим підходом є виробництво ПР, призначених для використання в сучасних твердопаливних опалювальних котлах [53]. Для цього можна ефективно використовувати біомасу різних культур, зокрема льону, кукурудзи, соняшника, зернових [19]. Властивості біомаси стебел сільськогосподарських культур відіграють вагомую роль у її ефективній обробці на біопаливо. Основні характеристики, які потрібно враховувати, включають еластичність, міцність, в'язкість, вміст вологи, щільність тощо [54, 55, 56]. Аналіз цих властивостей дозволяє оптимізувати налаштування обладнання, підвищити ефективність перероблення та якість виробленого біопалива.

Кращим варіантом оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур є отримання твердого палива, також її можна використовувати в якості будівельних матеріалів, підстилки для худоби, кормів для тварин, підстилки для вирощування овочів та компостування. Крім того льон, це – культура можливостей для виробництва товарів різного функціонального призначення: здорової їжі, текстилю, кормів для тварин, композитів і твердого палива. Використання цих залишків для різних цілей не тільки максимізує ефективність використання ресурсів, але й сприяє інноваціям та створює нові економічні можливості [23, 24, 25]. Грицюк К.Ю., Борзов В.В., Дударев І.М. досліджували використання відходів переробки льону, де розглядали екологічно чисті технології їх утилізації [57]. Головенко Т.М. Бойко Г.А., Іваненко О.О., Шовкомуд О.В. [58, 59] досліджували загальні характеристики показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів. Головенко Т.М. та ін. досліджували економічну доцільність перероблення стебел льону олійного на півдні України і нашої держави в цілому, вони встановили, що рентабельність перероблення стебел льону олійного із застосування іноваційних технологій складає 52%, а окупність затрат на створення нової технологійної лінії складає біля двох років [60].

БССК має великий потенціал для її оброблення в паливні матеріали. Для цього потрібно визначити, які види палива можна отримати із біомаси стебел сільськогосподарських культур.

1.4 Види палива із біомаси стебел сільськогосподарських культур

Стебла сільськогосподарських культур є цінною сировиною для виробництва різних видів твердого палива. Зокрема паливних брикетів, гранул (пелет) та рулони, це паливо має широкий спектр застосування, зокрема для опалення, виробництва електроенергії та теплової енергії. Паливо, отримане зі стебел сільськогосподарських культур, класифікується за фізичним станом на тверде, рідке та газоподібне [29]. Сировиною для твердого палива слугують стебла, насіннєві коробочки льону, лушпиння та інші залишки рослинного походження. Тверде

паливо застосовується для опалення або виробництва електроенергії. Рідке біопаливо виготовляється з жому, макухи, лушпиння, шкаралупи та інших побічних продуктів переробки сільськогосподарських культур і використовується як паливо для транспорту або для генерації теплової енергії.

Паливні брикети являють собою спресовані блоки палива, виготовлені з біомаси стебел сільськогосподарських культур. Їхня форма може бути прямокутною, циліндричною або іншою. Типовий діаметр ПБ становить 60–75 мм, а їхня довжина, зазвичай, не перевищує п'ятикратного діаметра. Стандартних розмірів ПБ не мають. Основні типи ПБ включають RUF [61], NESTRO (NIELSEN) [62] та Pini&Kay [63, 64], що отримали назви від провідних виробників пресів для їх виготовлення (рис. 1.7 а) [25, 65].

Гранули (пелети) (рис. 1.7 б) – це дрібні циліндричні частинки палива, що утворюються шляхом пресування сировини, зокрема деревини, соломи чи лушпиння соняшника. Вони широко використовуються в пелетних котлах і системах опалення.

Рулони (рис. 1.7 в) – це спресована циліндрична маса соломи чи сіна, що є різновидом тюків. Тюки, у свою чергу, мають прямокутну форму (рис. 1.7 г).



Рисунок 1.7 – Види твердого палива: а – ПБ; б – гранули;
в – рулони; г – тюки; [61, 62, 63]

Ефективне використання сільськогосподарських культур сприяє зменшенню залежності від традиційних видів палива та підвищенню екологічної стійкості енергетичного сектору. Енергетичний потенціал різних видів джерел енергії наведений у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Енергетичний потенціал різних видів джерел енергії [66]

| Джерела | Традиційні джерела енергії | | Біомаса сільськогосподарських культур | | | | | | | Деревна біомаса | | | |
|--------------------------------|----------------------------|-------|---------------------------------------|--------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|--------|-----|-------|
| | Кам'яне вугілля | Мазут | Кукурудза | Стебло льону | Солома пшениці | Стебло соняшнику | Ріпакова макуха | Лущиння соняшнику | Стебла бавовника | Кошикова верба | Тополя | Бук | Ялиця |
| Енергетичний потенціал, МДж/кг | 22 | 42 | 15 | 18 | 15 | 15 | 19 | 18 | 17,5 | 18,5 | 16 | 18 | 20,5 |

Із порівняння енергетичного потенціалу різних джерел енергії видно, що для кам'яного вугілля показники становлять 22 МДж/кг та 42 МДж/кг для мазуту. Серед БССК найбільший енергетичний потенціал має ріпакова макуха – 19 МДж/кг, лущиння соняшника – 18 МДж/кг, стебло льону – 18 МДж/кг, кошикова верба – 18,5 МДж/кг та стебла бавовника – 17,5 МДж/кг. Інші види біомаси сільськогосподарських культур, такі як солома пшениці, стебло соняшника та кукурудза, мають енергетичний потенціал на рівні 15 МДж/кг. Для порівняння, деревна біомаса демонструє показники від 16 МДж/кг (ялиця) до 18 МДж/кг (бук).

Тверде біопаливо із БССК є доцільним для використання, оскільки має енергетичний потенціал, який співвідноситься з деревною біомасою, а в окремих випадках навіть її перевищує. При цьому БССК є доступною, відновлюваною сировиною, що утворюється як побічний продукт аграрного виробництва.

Проте через значні габаритні розміри та велику вагу стандартних тюків та рулонів їх використання у невеликих котельнях та котлах є ускладненим. Тому необхідно провести додаткові дослідження, зокрема аналіз гаявних конструкцій для збирання та оброблення – БССК, які спрямовані на отримання паливних матеріалів з оптимальними параметрами, що будуть придатними для використання в сучасних твердопаливних котлах – паливні рулони (ПР) та брикети.

1.5 Аналіз конструкції машин для збирання та обробки біомаси стебел сільськогосподарських культур

БССК має значний, але недостатньо реалізований потенціал. Для ефективного збирання та подальшого оброблення БССК доцільно застосовувати спеціалізовані методи збирання (рис. 1.8). На їх основі необхідно провести аналіз сільськогосподарських машин і обладнання, здатних забезпечити оптимальні технічні рішення для збирання, транспортування та обробки стебел. Це дозволить підвищити ефективність використання БССК як енергетичного ресурсу та зменшити втрати під час збирання.

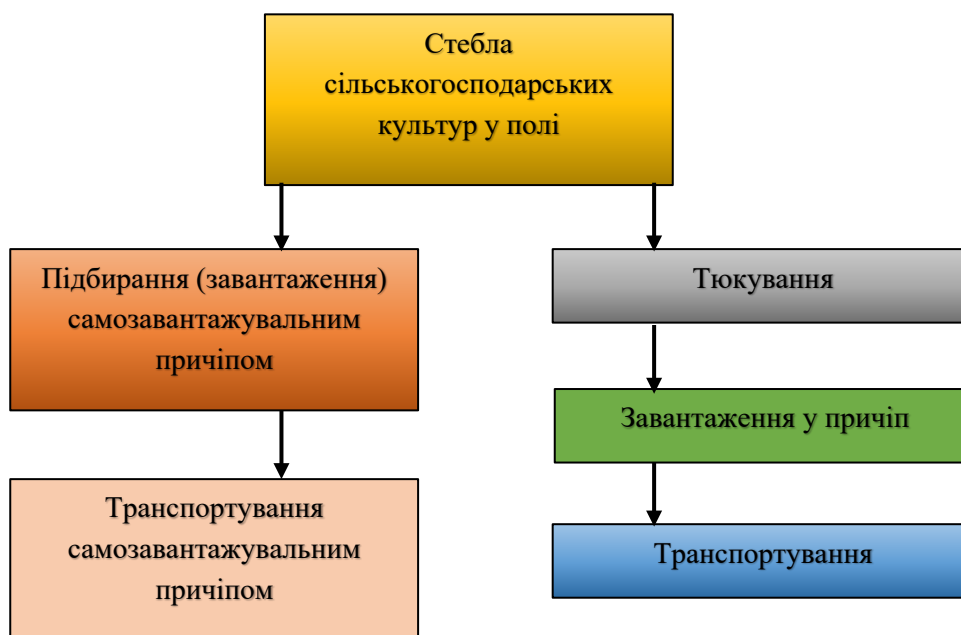


Рисунок 1.8 – Схема збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур

Біомаса стебел сільськогосподарських культур є важливим ресурсом, що може бути ефективно використаний у різних галузях (енергетика, тваринництво та агропромисловий комплекс). Для збирання біомаси застосовують два основні способи: тюкування за допомогою прес-підбирачів та використання самонавантажувальних причепів.

Тюкування за допомогою прес-підбирачів. Цей спосіб передбачає виконання кількох етапів: підбирання соломи з поля, її пресування у тюки або рулони, завантаження сформованих паків на причіп за допомогою навантажувача та транспортування до місця зберігання чи оброблення. Прес-підбирачі широко використовують завдяки їх здатності формувати компактні тюки, що значно спрощує транспортування, зберігання та подальше використання. Тюки можуть бути обмотані шпагатом або сіткою. Сітка забезпечує швидший процес роботи та полегшує розмотування матеріалу в подальшому.

Використання самонавантажувальних причепів. Цей метод, здебільшого, застосовується для збирання трав на силос, однак він також прийнятний для збирання стебел соломи. Самонавантажувальні причепа виконують функції підбирання та транспортування, що дозволяє зменшити кількість технологічних операцій.

Незважаючи на широкий вибір техніки, ефективність збирання та оброблення біомаси залишається актуальною проблемою. Це зумовлює необхідність розробки нових технічних рішень, модернізації робочих органів машин та вдосконалення процесу пресування.

Толстушко Н.О., Юхимчук С.Ф. займалися аналізом процесу транспортування стрічки стебел льону в пресувальну камеру змінного об'єму рулонного прес-підбирача. Було отримано залежності для визначення параметрів стрічки стебел льону [67].

Юхимчук С.Ф., Толстушко Н.О. запропонували методику для визначення щільності шарів стрічки стебел льону в рулоні, що сформований прес-підбирачем, у пресувальній камері якого встановлена підпружинена рамка з валиками [68].

Налобіна О.О., Герасимчук О.П., Ковальчук Р.В., Ткачук О.Л. виконали аналіз технології збирання стебел коноплі після збирання насіння зернозбиральним комбайном та запропонували пристрій для збирання стебел, що забезпечить зламання стебел, утворення рівномірного валка з паралельним розміщенням стебел у ньому, спростить формування рулонів з валка прес-підбирачем та покращить якість отриманої сировини [69].

Отже, ефективне використання стебел сільськогосподарських культур залежить від вдосконалення технологій збирання та оброблення, що дозволить максимально реалізувати потенціал у різних галузях.

Прес-підбирачі можуть бути різних типів, зокрема рулонні та тюкові моделі, що показані на рисунку А.1 додатку А.

Прес-підбирачі рулонного типу для збирання та оброблення БССК поділяються на два основні типи залежно від конструкції пресувальної камери: постійного об'єму (рис.1.9.а), що утворені металевими вальцями, роликівими або короткими пасовими транспортерами, та змінного об'єму (рис.1.9 б), що утворені нескінченими пасами [70,71,72]. Толстушко Н.О., Хайліс Г.А. [73] у своїх працях визначили основні параметри робочих органів удосконаленої пресувальної камери змінного об'єму рулонного прес-підбирача. На рис. 1.9 в, зображена пресувальна камера рулонного прес-підбирача. Дідух В.Ф., Буснюк В.В., Бойчук Б.В., Ягелюк С.В. запропонували машина для формування паливних рулонів (рис. 1.9 г), що містить опорні колеса, на яких встановлена рама з розміщеними на ній підбирачем, механізмами приводів, а також пресувальною камерою змінного об'єму, до рами якої додатково прикріплені подрібнювач, формувач шару та транспортер для вивантаження готових рулонів [74].

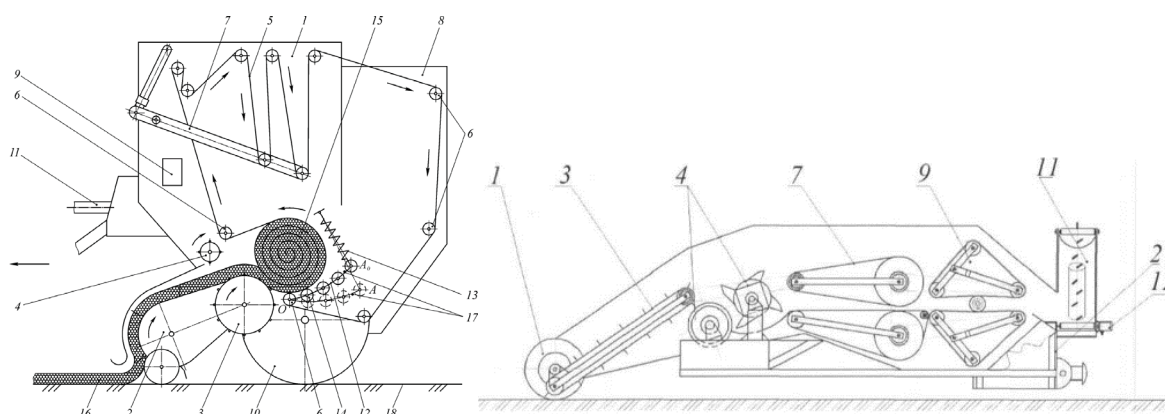
В Україні представлені прес-підбирачі відомих виробників, таких як: CLAAS, KRONE, John Deere, Case, AGCO, Kuhn та ін. Також в Україні певний час випускались вітчизняні прес-підбирачі: рулонний прес-підбирач ППР-110, рулонний пасовий підбирач ПР-1,2 та рулонний безпасовий причіпний прес-підбирач ПРП-750М, рулонний прес-підбирач напівпричіпний ПРН-145, начіпний прес-підбирач МП-1.

Аналіз різноманітних конструкцій робочих органів прес-підбирачів, що виконують функції з пресування біомаси стебел сільськогосподарських культур подано в наукових працях, Сумського Н.А., Єременко О.І., Кузьменка В.Ф., Комарека В. Костюкіна М., Толстушка М.М. та ін [75, 76, 77].



а

б



в

г

Рисунок 1.9 – Типи камер пресування прес-підбирачів, машини для формування паливних рулонів: а – камера постійного об'єму; б – камера змінного об'єму; в – пресувальна камера рулонного прес-підбирача; г – машина для формування паливних рулонів [70, 73, 74]

Прес-підбирачі з камерою змінного об'єму оснащені пресувальною камерою, розмір якої змінюється в процесі формування рулону. Основними елементами таких машин є підбирач, пресувальна камера зі змінним об'ємом, механізм обв'язування та система вивантаження рулонів:

- підбирач збирає скошену масу з поля та подає її до пресувальної камери;

- пресувальна камера складається з ременів або ланцюгів, які утворюють змінний об'єм. По мірі надходження біомаси об'єм камери збільшується, формуючи рулон потрібного діаметра;
- механізм обв'язування після досягнення заданого розміру рулону автоматично обмотує його шпагатом або сіткою для збереження форми;
- система вивантаження після обв'язування відкриває задню частину камери, вивантажуючи готовий рулон на поле.

Принцип роботи. Основними робочими органами рулонних прес-підбирачів зі змінною камерою пресування є системи нескінченних пасів, які забезпечують обертання рулону. Подача стебел здійснюється підбирачем та барабаном у пресувальну камеру. У міру надходження матеріалу відбувається збільшення стиску пасів, що викликає підняття важеля та переміщення натяжного пристрою з роликками. Це сприяє збільшенню об'єму пресувальної камери, а швидкість обертання рулону поступово зменшується.

Циліндрична форма рулону підтримується відбійним валиком. Після завершення формування рулону здійснюється його обв'язування та автоматичне вивантаження шляхом підняття задньої стінки машини [78].

Єременко О.І. та Кузьменко В.Ф. у своїх працях вказують, що прес-підбирачі з камерою постійного об'єму є простішими за конструкцією та надійнішими в роботі [76]. Згідно з дослідженнями Сумського Н.А., Єременка О.І., Кузьменка В.Ф., Комарека В. Костюкіна М. [77, 78] рулони, спресовані за допомогою прес-підбирачів з постійною камерою, мають правильну циліндричну форму, з серцевиною меншої щільності, і це дозволяє досушувати їх в полі або використовувати метод активного вентилявання, проте через те, що серцевина рулону меншої щільності призводить до їх просідання у штабелях, швидкого зволоження і псування матеріалу під час опадів. У прес-підбирачах з камерою постійного об'єму не має можливості змінювати об'єм рулону.

Перевагами прес-підбирачів з камерою змінного об'єму є універсальність – можливість налаштування діаметра рулону під різні культури та умови збирання. Висока щільність пресування забезпечує формування щільних рулонів, що сприяє

кращому збереженню кормів. Крім того, деякі моделі прес-підбирачів оснащені системами для швидкого очищення від забиття безпосередньо з кабіни оператора.

Недоліками прес-підбирачів з камерою змінного об'єму є складність конструкції – більш складна будова може вимагати частішого технічного обслуговування; вища вартість – зазвичай дорожчі порівняно з прес-підбирачами постійного об'єму [73, 75].

Принцип роботи. Під час руху прес-підбирач ПРН-145 (рис. А.2, додадок А) з трактором, маса із валка підбирається пружинними зубами підбирача і подається до пресувальної камери. У камері за допомогою барабана та пресувального механізму маса закручується у рулон. Попереднє ущільнення маси забезпечується гребінкою. По мірі збільшення щільності рулону задня частина пресувальної камери відходить від передньої, а сигналізатор ступеня ущільнення подає сигнал про завершення формування рулону та необхідність подачі шпагату для обмотування. Завершальним етапом є вивантаження рулону, що відбувається за допомогою гідроциліндрів [75,77].

Перевагами прес-підбирачів з камерою постійного об'єму є простота конструкції – менша кількість рухомих частин знижує ймовірність поломок; надійність – завдяки простішій конструкції такі машини можуть бути більш надійними в роботі; доступніша ціна – зазвичай дешевші, ніж моделі зі змінним об'ємом.

Недоліками прес-підбирачів з камерою постійного об'єму є обмежена універсальність – фіксований розмір рулону може не підходити для всіх видів культур та умов збирання; менша щільність рулонів – в основному щільність пресування є нижчою, ніж у прес-підбирачів зі змінним об'ємом.

Рулони, спресовані за допомогою прес-підбирачів з постійною камерою, мають правильну циліндричну форму з серцевиною меншої щільності, і це дозволяє досушувати їх в полі або використовувати метод активного вентилювання, проте через те, що серцевина рулону меншої щільності призводить до просідання виробів у штабелях, швидкого зволоження і псування матеріалу під час опадів [75, 76]. Прес-підбирачі зі змінним об'ємом забезпечують більшу універсальність та

щільність рулонів, проте є дорожчими та складнішими в обслуговуванні. Натомість прес-підбирачі з постійним об'ємом відзначаються простотою, надійністю та доступнішою ціною, але мають обмеження щодо розміру рулонів та щільності пресування [74].

Основні характеристики тьюкових прес-підбирачів наведено в таблиці Б.1 у додатку Б, рулонних прес-підбирачів у таблиці Б.2 додатку Б.

Низька продуктивність механізмів для підбирання стебел сільськогосподарських культур призводить до підвищеної потреби в використанні тракторів, що затримує виконання подальших операцій із оброблення ґрунту. Метод збирання стебел, зокрема із попереднім подрібненням і завантаженням у змінні причепи, суттєво впливає на енерговитрати, що підвищуються на 20–25%, а також зменшує продуктивність зернозбиральних комбайнів на 10–12%. Незважаючи на зазначені недоліки, даний метод збирання стебел сільськогосподарських культур забезпечує розширення можливостей використання зібраної маси. Зокрема, подрібнені стебла можуть використовуватися як корм, підстилка або сировина для виробництва твердого біопалива [80].

Самонавантажувальний причіп (рис. А.3 додаток А), складається з підбирача та кузова, на якому розміщені транспортери, що переміщують масу до вивантажувального механізму.

Ягелюк С. В., Толстушко Н.О., Хайліс, Г. А. проводили дослідження із скручування льону в рулони [11, 67, 79], проте вони не добавили інші стебла сільськогосподарських культур, наприклад, стебел пшениці, які можуть також доповнити якісні показники рулонів в якості паливного матеріалу.

Теоретичні та експериментальні дослідження процесів при пресуванні прес-підбирачами проводились багатьма авторами в різні роки і за різних умов. До таких досліджень відносяться роботи Толстушко Н.О., Хайліса Г.А. [78, 79], у своїх працях вони визначили основні параметри робочих органів удосконаленої пресувальної камери змінного об'єму рулонного прес-підбирача. Було надано залежності для обґрунтування параметрів робочих органів цієї пресувальної камери змінного об'єму.

Дослідженням відновлення стебел льону олійного та льону довгунця займалась Ягелюк С.В. [12], отримання циліндричного пакунка в сформованому стані забезпечується за рахунок потенційної енергії, яка виникає у випадку рівномірного навивання щільних шарів від центра до периферії.

Налобіна О.О., Пуць В.С. [83] теоретично обґрунтували умови, за яких забезпечується одночасне розпушування та підрівнювання стрічки підбійками механізму підрівнювання стрічки з двох кінців стебел, яка транспортується в обертачеві–підбирачеві ОСН–1.

Толстушко Н.О., Юхимчук С.Ф., Пуць В.В. запропонували методику та результати експериментального дослідження стиску стрічки стебел льонотрести. Встановили залежність тиску пресування стеблової стрічки льонотрести від його щільності [84].

Експериментальними дослідженнями викривлення стебел льону під час поздовжнього стиску з метою визначення допустимих переміщень робочих органів пристроїв для підрівнювання стрічок льону займались Пуць В.С., Ткачук О.Л., Клименко О.Д [85].

Дослідженням параметрів робочих органів підрівнювальних пристроїв та їх узгодження з фізико–механічними властивостями стебел виконувалися багатьма науковцями, зокрема Хайлісом Г.А., Ковальовим М.М. [86].

Аналіз конструкцій різних машин для збирання та оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур показав, що для ефективного виробництва твердого палива у вигляді рулонів доцільно використовувати пресувальну камеру змінного об'єму. Однак, для досягнення кращих пресувальних властивостей, необхідно врахувати переваги камер як змінного, так і постійного об'єму.

Обладнання для виготовлення паливних брикетів. Виготовлення паливних брикетів типу RUF відбувається гідравлічним пресом (рис. 1. Додаток В) наступним чином: подрібнена сировина засипається у бункер, звідки за допомогою шнекового конвеєра спрямовується в камеру завантаження; пресування сировини проходить у камері пресування, де пресувальний шток стискає матеріал у прес формі, внаслідок чого брикет набуває необхідної форми та щільності [61].

Брикети NESTRO виготовляють у гідравлічних пресах, а брикети NIELSEN – в ударно–механічних пресах (рис. 2. Додаток В) [25, 64].

Принцип дії ударно–механічних пресів типу NIELSEN ґрунтується на безперервному зворотно–поступальному русі ударного механізму, який приводиться в дію системою маховиків. Один із маховиків одночасно виконує функцію приводного шківів. Сировина в подрібненому вигляді подається з основного бункера, обладнаного ворушником, до камери попереднього пресування за допомогою шнека–дозатора. Далі вертикальний шнек із приводом від мотор–редуктора створює початкове ущільнення сировини перед надходженням до основної камери ударного механізму. У момент зворотного ходу бойок відбувається відкриття камери, куди вертикальний шнек подає ущільнену масу сировини. Після цього бойок ударного механізму виконує запресування матеріалу у фільтеру. Завдяки внутрішній конусності фільтери матеріал піддається високому ступеню компресії. У процесі пресування внаслідок внутрішнього тертя та взаємодії зі стінками фільтери сировина нагрівається, що сприяє формуванню брикету. Для забезпечення додаткового опору матеріалу на виході з камери пресування встановлюються вантажі з системою регулювання зусилля притискання, які діють на магістраль охолодження. Це дозволяє досягти необхідної щільності та міцності готових брикетів [72].

Для виготовлення ПБ Pini&Kau використовується лінія (рис. 1.10), яка складається з: барабанного подрібнювача, дробарки, барабанної сушарки, машини для брикетування, пристрою для очищення димових газів.

Семіренко С.Л. [88] проводив дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від деяких факторів. Костюкін М., Карманов В., Михайлик В. [89] досліджували процес пресування костриці льону, лушпиння соняшника та тирси деревини з метою отримання паливних гранул, брикетів, зокрема, визначили вплив тиску і температури пресування на щільність отриманого продукту.

Цизь І.Є., Мельник О.О., Романюк Н.М., Бабич М.О. проводили теоретичне дослідження процесу ущільнення рослинного матеріалу у конічній частині корпусу преса. Отримали диференціальне рівняння, що описує цей процес [90].

Проте не було досліджено пресування паливних брикетів із різних сумішей, стебел льону та пшениці у різних співвідношеннях.



Рисунок 1.10 – Лінія виробництва ПБ типу Pini&Kay: 1 – сировина; 2 – ПБ [85]

Дослідники, зокрема Хайліс Г.В., Ягелюк С.В., Цизь І.Є., Мельник О.О., Дідух В.Ф., вивчали закономірності поперечного стиску, різання та впливу вологості на деформаційні характеристики стебел сільськогосподарських культур.

Проте, незважаючи на наявність ґрунтовних напрацювань, не було проведено досліджень: формування ПР із суміші стебел льону та пшениці, вплив співвідношення льон/пшениця у біомасі на щільність, міцність та енергетичну ефективність ПР не розглядався в жодній із відомих праць.

У дослідженнях [66, 67, 75] вивчались параметри транспортування та пресування біомаси у рулонних прес-підбирачах, однак відсутнє дослідження пресування БССК різного складу у стаціонарних умовах з метою формування ПР без обв'язування.

Відповідно до RUF briquetting systems, C.F. Nielsen A/S та ін. [61, 62, 63, 64], розглядались способи виготовлення ПБ із окремих видів біомаси (льон, солома, лушпиння), проте не проводилось дослідження процесу пресування ПБ із стебел льону та колосових зернових у різних пропорціях.

У працях Ягелюк С.В., Пуць В.С., Ткачук О.Л. [12, 85, 86] аналізувались

деформаційні властивості стрічки трести льону, проте не було досліджено параметри ПР із додаванням інших стеблових компонентів, зокрема злакових культур, які могли б підвищити технологічні властивості паливних рулонів.

У роботах [67, 68, 73] здійснено аналіз конструкцій рулонних прес-підбирачів постійного та змінного об'єму, однак не розглядалися технічні рішення щодо стаціонарних установок для формування ПР з БССК з різним складом, які б забезпечували зниження витрат на транспортування техніки в поле.

Аналіз конструкцій машин для збирання та оброблення БССК показав, що вони формують рулони, тюки великого розміру та з одного компонента (сировини), тому виникає задача у проектуванні стаціонарної машини, що буде формувати компактні паливні рулони розміру з двох компонентів – стебел льону та стебел колосових зернових. Це пов'язано з тим, що стаціонарне обладнання забезпечує вищу стабільність процесу виробництва, а також дозволяє знизити витрати на транспортування великих агрегатів до польових умов.

1.6 Висновки, мета та задачі дослідження

Виробництво колосових зернових та льону залишається стабільними і відображає тенденції, що формують сільське господарство, підкреслюючи важливість цих культур для задоволення різноманітних потреб. Враховуючи, що з кожним роком збільшуються посівні площі пшениці та льону, можна передбачити зростання проблем з утилізацією БССК. Тому для подальших досліджень потрібно знати особливості вирощування колосових зернових та технічних культур, а саме пшениці та льону.

Спільним для колосових зернових та льону є те, що при збиранні основного врожаю зерна залишаються відходи – стебла сільськогосподарських культур які потрібно використовувати для подальшого оброблення, для цього необхідно проаналізувати види та характеристики залишків сільськогосподарських культур. З огляду на те, що стебла колосових зернових та технічних культур, а саме льону, мають подібну морфологічну будову та фізико-механічні властивості, ці культури є

доцільними для дослідження як джерело сировини для виробництва різної продукції.

Наймасовішими та придатними до перероблення залишками є стебла соломи колосових та інших культур – 588 100,7 т. , крім того можна виокремити також луб'яні та олійні культури, які традиційно вирощувались на території Волинської області, – 83 834,5 т.

Стебла колосових зернових та льону як сировина для виготовлення паливних матеріалів мають спільні характеристики та властивості. Також варто зазначити, що досліджувались тільки стебла, а біомаса в загальному не розглядалась, тому потрібно враховувати інші частини рослин, їхні суміші, для отримання повнішої оцінки. Це дозволить забезпечити більш комплексний підхід до аналізу продуктивності та екологічної ролі рослин, а також оцінити їхній потенціал у різних галузях, наприклад, у виробництві біопалива. Також потрібно визначити напрям використання БССК для їх подальшого використання.

Тверде біопаливо із БССК є доцільним для використання, оскільки має енергетичний потенціал, який співвідноситься з деревною біомасою, а в окремих випадках навіть її перевищує. При цьому БССК є доступною, відновлюваною сировиною, яка утворюється як побічний продукт аграрного виробництва.

Проте через значні габаритні розміри та велику вагу стандартних тюків та рулонів їх використання у невеликих котельнях та котлах є ускладненим.

Аналіз конструкцій машин для збирання та оброблення БССК показав, що вони формують рулони, тюки великого розміру з одного компонента (сировини), тому виникає необхідність у проектуванні стаціонарної машини, яка буде формувати компактні паливні рулони з двох компонентів – стебел льону та пшениці. Це пов'язано з тим, що стаціонарне обладнання забезпечує вищу стабільність процесу виробництва, а також дозволяє знизити витрати на транспортування великих агрегатів до поля.

На основі цього метою роботи є підвищення якості ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур у компактні паливні рулони шляхом обґрунтування

раціональних параметрів та режимів роботи засобу оброблення та вдосконалення способу збирання біомаси.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання дослідження:

- розробити класифікацію залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, видів твердого біопалива з них та засобів для їх оброблення;

- вдосконалити спосіб збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур;

- обґрунтувати параметри пресувальної камери змінного об'єму та дослідження взаємодії підпружинених роликів з біомасою стебел сільськогосподарських культур під час формування компактних паливних рулонів;

- поглибити дослідження фізико–механічних властивостей стебел льону, колосових зернових культур та їх подрібненої маси;

- розробити математичну модель процесу ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур для визначення раціональних параметрів формування компактних паливних рулонів у пресувальній камері змінного об'єму;

- дослідити якісний та кількісний склад викидів димових газів під час спалювання нового твердого біопалива;

- визначити комплексний показний показник якості компактних паливних рулонів та економічний ефект впровадження розробленої камери змінного об'єму для формування компактних паливних рулонів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБУ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ БІОМАСИ СТЕБЕЛ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

2.1 Програма досліджень

Для удосконалення засобів оброблення БССК потрібно провести комплекс теоретичних та експериментальних досліджень. Послідовність і логіку проведення яких визначено у програмі досліджень, структурно відображеній на схемі (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Схема програми досліджень

Програма досліджень включає такі етапи. Спочатку провели аналіз існуючих досліджень, спрямований на визначення можливостей використання БССК. Зокрема, розглядаються процеси виробництва ПР та ПБ, а також аналізуються залишки БССК для встановлення їхніх властивостей.

Теоретичні дослідження передбачають розробку класифікації, яка включає виділення категорій залишків БССК, визначення видів палива, яке можна отримати з БССК, а також ідентифікацію машин та засобів, що застосовуються для оброблення таких залишків. На цьому етапі також пропонуються вдосконалення, які передбачають розробку пресувальної камери змінного об'єму (КПЗО) та вдосконалення способу збирання БССК.

Для реалізації програми розробляється методика та проводяться дослідження, які охоплюють вивчення вологості БССК, ПР та ПБ з різним співвідношенням складових частин (льону та колосових зернових), дослідження пружних властивостей стебел після дії на робочих органів машин, подрібнення БССК, визначення щільності ПР з різним співвідношенням складових частин (льону та колосових зернових).

У межах програми встановлюються характеристики та показники якості ПР як результату застосування засобу оброблення БССК. Для цього визначається склад продуктів згоряння за допомогою сучасних методів аналізу, розраховується комплексний показник якості ПР і оцінюється економічний ефект від впровадження розробленої КПЗО для формування ПР.

Для виконання програми досліджень у даному розділі обґрунтовується класифікація залишків БССК, видів палива та машин для їх оброблення. Основну увагу приділено стеблам сільськогосподарських культур як сировині для твердого біопалива. На основі аналізу встановлено, що найбільш раціональною продукцією є паливні рулони. Для їх формування доцільно застосовувати камеру пресування змінного об'єму (КПЗО), яка забезпечує ущільнення біомаси з контролем щільності компактного паливного рулону. Необхідно проаналізувати роботу пресувальної камери та запропонувати вдосконалений засіб оброблення БССК та спосіб збирання сільськогосподарських культур.

2.2 Обґрунтування класифікації залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур, видів палива та машин для їх оброблення

2.2.1 Розробка класифікації залишків біомаси стебел сільськогосподарських культур. Відповідно до представленої програми досліджень (рис. 2.1) та інформації розділу 1, пункту 3, можна запропонувати варіанти оброблення БССК з метою отримання твердих паливних матеріалів, які представлені на рис. 2.2. Аналіз даних свідчить про те, що рослинну біомасу можна класифікувати за видом сільськогосподарської культури, етапом технологічного процесу, на якому отримані рослинні залишки, а також за напрямом їх подальшого використання.



Рисунок 2.2 – Оброблення БССК з метою отримання твердих паливних матеріалів

Згідно з інформацією [2] щодо якості та кількості рослинної біомаси, що залишається після збирання основного урожаю, можна зробити висновок, що найбільш поширеними та придатними до перероблення є стебла таких культур: колосові зернові, луб'яні та олійні культури. На основі проаналізованих даних запропонована класифікація біомаси сільськогосподарських культур за основними ознаками (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Класифікація біомаси сільськогосподарських культур за основними ознаками

| Культура | Продукція | Відходи | | Використання (пропозиція) | |
|------------------|-----------|-------------------------|--|---|---|
| | | первинні | вторинні | первинні | вторинні |
| Колосові зернові | зерно | стебло (солома) | некондиційне зерно | корм, добрива, тверде паливо (ПР, ПБ) | корм для тварин |
| Льон олійний | насіння | стебло (солома), треста | лушпиння, макуха, шрот, некондиційне насіння | текстильне волокно, неорієнтоване волокно, тверде паливо (ПР) | харчові продукти (халва), корм для тварин, тверде паливо (ПБ) |
| Льон-довгунець | стебло | некондиційне стебло | костриця, лушпиння, некондиційне насіння | тверде паливо (ПР) | корм для тварин, тверде паливо (ПБ, ПР) |

На основі класифікації біомаси сільськогосподарських культур за основними ознаками (табл. 2.1), можна зробити висновок, що для більшості сільськогосподарських культур основними відходами, які потребують оброблення після збирання врожаю, є стебла. Лушпиння, неконденційне зерно та відходи оброблення колосових зернових та льону становлять вторинну складову відходів. Обидві складові є придатними для виготовлення різних видів твердого біопалива. Проте в сучасних умовах найбільш доцільним є використання стебел.

2.2.2 Розробка класифікації видів палива із біомаси стебел сільськогосподарських культур. Для виробництва твердого біопалива можна використовувати колосові зернові культури та льон. Це пояснюється

морфологічною подібністю їхніх стебел: обидва типи характеризуються порівняно однаковою довжиною, зручністю для скручування, подрібнення, пресування. Такі особливості сприяють кращій адаптації процесів оброблення, забезпечуючи високу ефективність пресування та стабільну якість готової продукції. Класифікація пропонує видів палива із БССК подана в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Класифікація видів палива із БССК

| Вид палива | Культура | Тип сировини | |
|--|----------------------|--|---|
| | | Первинна біомаса | Вторинна біомаса |
| ПБ, гранули (тверде паливо) | Зернові колосові | Стебло (солома) | Відходи подальшої оброблення насіння |
| | Олійні та луб'яні | Стебло (солома), неконденційне стебло (солома) | Відходи подальшої оброблення насіння та стебла |
| Рулони, тюки, ПР (тверде паливо) | Зернові колосові | Стебло (солома) | - |
| | Олійні та луб'яні | Стебло (солома), неконденційне стебло (солома) | - - |

З БССК можна отримати різні види твердого палива. Первинна біомаса, стебла (солома) та вторинна біомаса, а саме відходи подальшої оброблення насіння використовуються для виготовлення ПБ, гранул, тоді як для виготовлення тюків, рулонів, ПР підходить тільки первинна біомаса стебла (солома). Раціональними видами палива з стебел (первинної біомаси) колосових зернових та льону є ПР, а з вторинної біомаси – ПБ.

Для виробництва найбільш раціональної продукції, а саме ПР та ПБ основними операції оброблення спільними для біомаси залишків сільськогосподарських культур є: подрібнення, скручування, ущільнення, пресування.

2.2.3. Вибір засобу для оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур. На основі розроблених класифікацій, аналізу машин та засобів для оброблення, можна запропонувати узагальнену схему засобів оброблення залишків БССК (рис. 2.3).

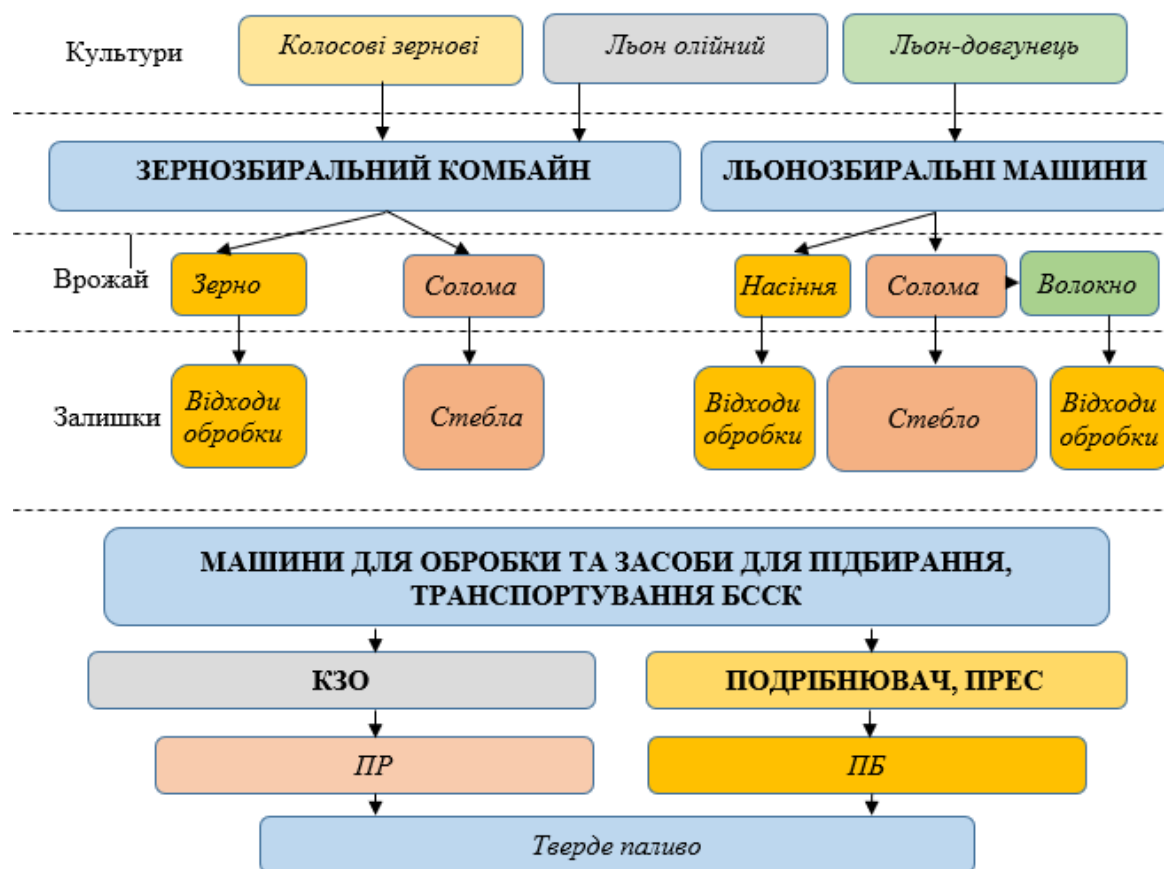


Рисунок 2.3 – Узагальнена схема засобів оброблення залишків БССК

Виготовлення ПР та ПБ містить кілька ключових етапів оброблення біомаси. Насамперед здійснюється подрібнення, що полегшує подальшу переробку, покращує зчеплення частинок матеріалу та сприяє рівномірному ущільненню. Ущільнення яке забезпечує зменшення об'єму БССК. Скручування, яке відіграє важливу роль у формуванні ПР, забезпечуючи компактність, необхідну щільність ПР. Пресування, під час якого матеріал піддається дії високого тиску, що дозволяє отримати щільну і міцну структуру палива, зручну для транспортування та використання - ПБ.

Для ефективної реалізації виготовлення ПР з БССК необхідно розробити вдосконалену конструкцію КПЗО, яка в стаціонарних умовах забезпечить безперервне скручування (формування) ПР. Крім того, для забезпечення повернення поживних речовин в ґрунт при збиранні БССК необхідно запропонувати спосіб збирання, з допомогою якого можна отримати сировину для виготовлення твердого палива та зменшити витрати на добрива.

2.3 Обґрунтування параметрів паливних рулонів та вихідних даних для розрахунку пресувальної камери

Відповідно до інформації, наведеної в підрозділі 2.2, раціональною продукцією з біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК) є паливні рулони, а основним засобом її оброблення – камера пресування змінного об'єму (КПЗО). З урахуванням можливостей транспортування, складування, а також габаритних розмірів завантажувальних отворів промислових твердопаливних котлів типу KALVIS – 400 (до 1090x800 мм), доцільно прийняти максимальні розміри паливного рулону: діаметр паливного рулону $d_{sp}=600$ мм ($R_{sp}=300$ мм); висота паливного рулону $h=500$ мм. Пресувальна камера повинна забезпечити ущільнення рулону в межах цих розмірів. З урахуванням технологічних зазорів і конструктивних механізмів ущільнення, внутрішній діаметр камери повинен становити не менше 620–650 мм, а довжина робочої зони – не менше 520 – 550 мм. Маса паливного рулону залежить від його геометричних параметрів та щільності, можна розрахувати за формулою:

$$m = \rho \cdot V$$

де $V = \pi R^2 h$, м³;

ρ – щільність рулону, кг/м³

Відповідно, до аналізу існуючих досліджень, наведеному у розділі 1, вихідними характеристиками рулону, будуть: $h = 40 - 50$ см, радіус рулону $R = 15 - 30$ см, $m=2,8 - 18,8$ кг. Рекомендований діапазон щільності для забезпечення ефективного горіння $80 - 140$ кг/м³. Для отримання ПР із заданими параметрами в стаціонарних умовах потрібно розглянути процес його формування. У КПЗО (рис. 2.4) по транспортерній стрічці надходить БССК через обмежувач 8. З допомогою (нерухомих роликів) притискних 1, 2 та ущільнювальних (рухомих) роликів 3, 4, 5 формується ПР. Пружини стиснення 10 забезпечують рівномірний тиск роликів, де з кожним обертом посилюється дія пружин стиснення 10. Це дозволяє отримати ПР необхідної щільності та форми. Коли ПР 7 сформований спрацьовує гідроциліндр 9,

який тягне вниз ролики 4, 5 дозволяючи вивільнити ПР та підготувати КПЗО для наступного ПР.

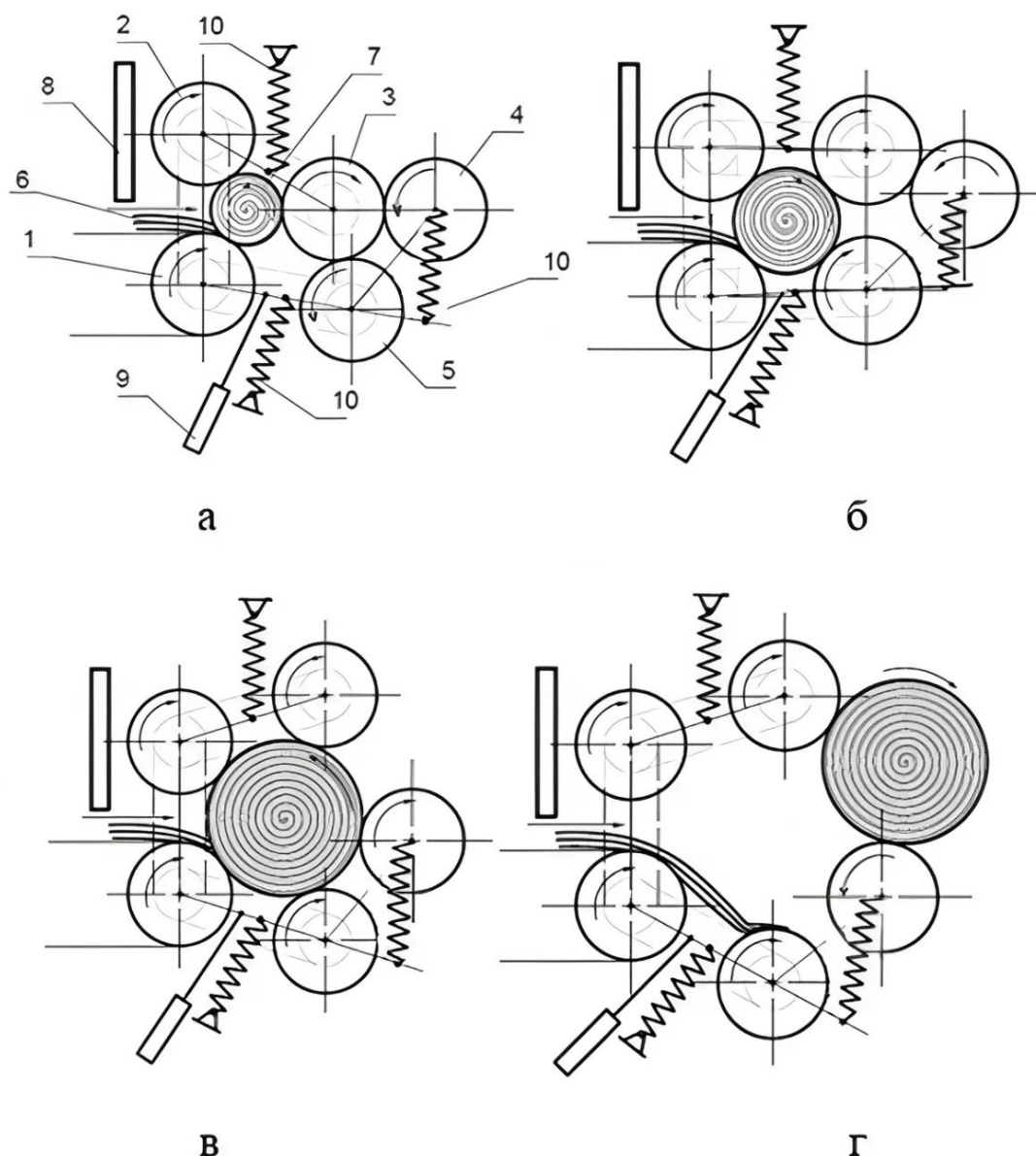


Рисунок 2.4 – Етапи формування ПР у КПЗО: а - перший етап формування ПР: 1, 2 – притискні (не рухомі) ролики; 3, 4, 5 – ущільнювальні (рухомі) ролики; 6 – БССК; 7 – ПР; 8 – обмежувач; 9 – гідроциліндр; 10 – пружини стику; б – другий етап формування ПР, в – третій етап формування ПР, г – вивантаження ПР з КПЗО

З операцій формування ПР із БССК виділимо 3 етапи. Перший етап (рис. 2.4 а) характеризується початком переміщення ролика 3, вільний простір круглої форми є початковою формою пресувальної камери, де під дією роликів, відбувається

ущільнення та обертання стрічки із БССК. З кожним новим шаром БССК дія пружин посилюється, що дозволяє отримати рулон необхідної щільності.

Другий етап формування ПР (рис. 2.4. б) характеризується збільшення радіуса ПР від початку контакту з чотирма роликками.

Третій етап формування ПР (рис. 2.4. в) відрізняється від другого тим, що через збільшення його діаметру на нього діють всі п'ять роликів. Третій етап триває від початку взаємодії ПР з п'ятим роликком до його повного завершення операції формування та вивантаження (рис. 2.4. г) з КПЗО.

Щільність ПР залежить від нормальних сил (сил притискання роликів) які створюють підпружинені ролики, що тиснуть на БССК. З їх збільшенням – ущільнення стає інтенсивнішим. Відповідно щільність можна регулювати, підбираючи значення нормальних сил (сил притискання роликів), які діють під час кожного етапу формування ПР. Тобто щільність можна виразити через залежність $\rho = F(N)$, де: ρ – щільність ПР, N - нормальні сили (сили притискання роликів).

Тому потрібно теоретично дослідити процес формування ПР на кожному етапі. Для забезпечення ефективного ущільнення паливного рулону (ПР) необхідно встановити залежність між ущільненням БССК та геометрично-силовими параметрами механізму КПЗО.

2.4 Аналіз роботи камери пресування

Щільність паливного рулону з БССК залежить від тиску, створюваного роликками камери пресування, і об'єму погонного метра стрічки стеблової біомаси, яка подається в камеру. Розглянемо три положення механізму КПЗО, де аналізується взаємодія сил, що діють на компактного ПР, та їхні моменти сил відносно заданих точок обертання роликів. Стабільність формування компактного ПР та рівномірний розподіл тиску, тобто сил притискання роликів залежить від жорсткості пружин на кожному етапі формування ПР. Тому основним завданням є теоретичне визначення раціональної жорсткості пружин у кожному положенні роликів КПЗО, що відповідають певному етапу формування.

Схема першого етапу формування ПР показана на рис. 2.5. На ній розглянуто рівновагу сил, що діють на серцевину ПР. Залежності між силами, що діють на серцевину ПР, та їхніми моментами отримуються з рівнянь моментів сил відносно заданих точок обертання роликів, враховуючи кути нахилу сил, їхні плечі та вагу елементів механізму, з урахуванням принципу звільненості від вязів.

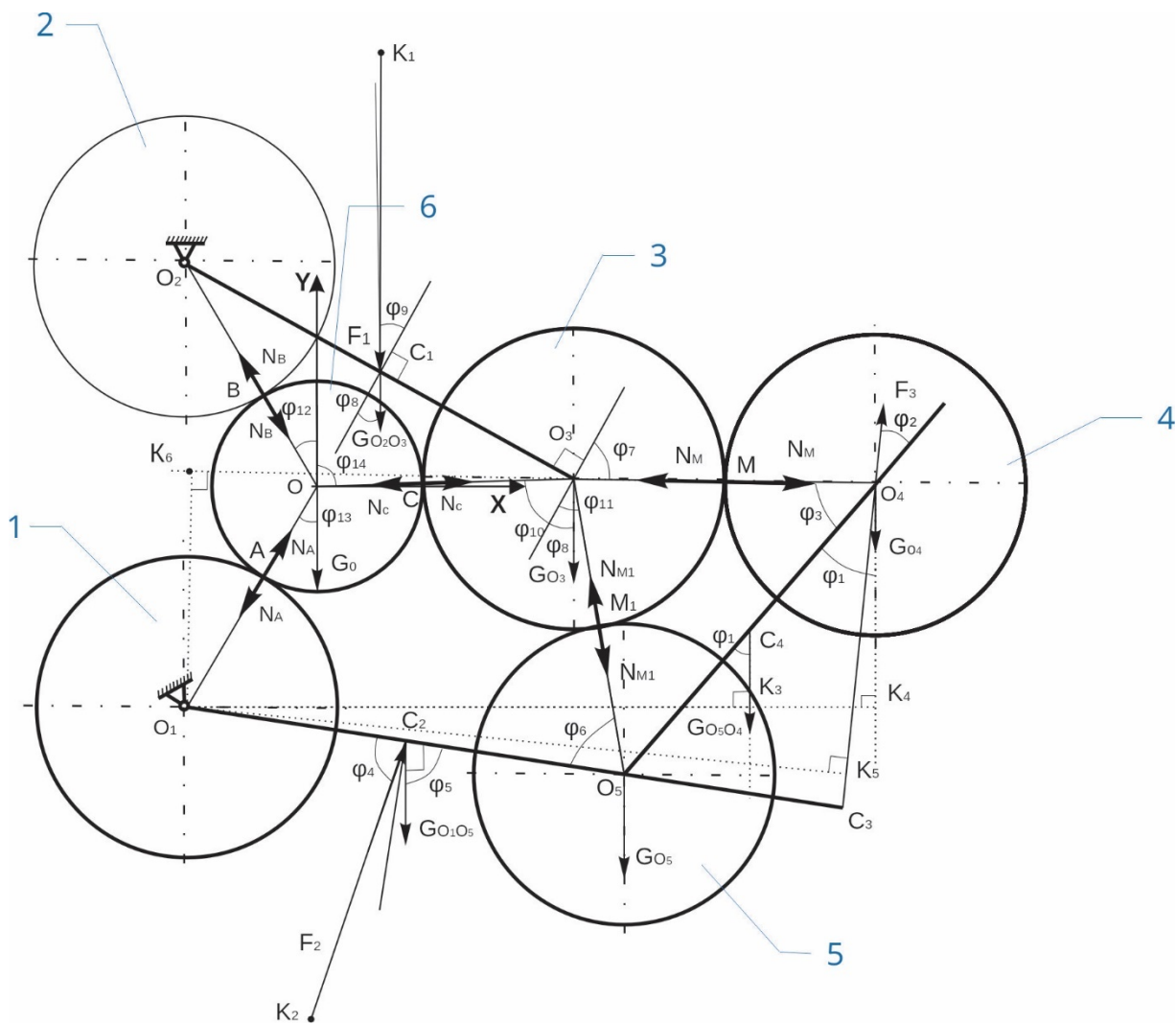


Рисунок 2.5 – Схема першого етапу формування ПР: 1, 2 – притискні (нерухомі) ролики; 3, 4, 5 – ущільнювальні (рухомі) ролики; 6 – ПР;

Основні позначення на рис. 2.5 відповідають ключовим елементам механізму та силам, які на них діють:

- O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 – точки на осі обертання роликів, які беруть участь у формуванні ПР. Ці точки є основними опорними точками обертання роликів. Рулон контактує з роликами в точках А, В, С.

- N_A, N_B, N_C – нормальна сила яка виникає у точках A, B, C контакту з ПР.

Ці сили визначають тиск, який ролики передають на рулон.

Сили, що виникають у результаті деформації пружин роликів – F_1, F_2, F_3 . А саме:

- F_1 – це сумарна сила, яка виникає від пружин важеля O_2O_3 . Вона діє на ПР у точці B і спрямована перпендикулярно до лінії дії ролика. Сила F_1 забезпечує притискання біомаси до поверхні рулону, сприяючи його ущільненню та стабільному обертанню під час формування серцевини рулону. Величина F_1 залежить від жорсткості пружини та відстані її деформації, викликані збільшенням діаметра рулону.

- F_2 – це сумарна сила, яка виникає від пружин притискного ролика 1 з центром O_1 на осі обертання. Вона діє на ПР у точці A , забезпечуючи додатковий тиск на серцевину рулону на початковій стадії формування. Як і F_1 , ця сила залежить від жорсткості пружини важеля та її деформації.

- F_3 – це сумарна сила, яка виникає від пружин ущільнювального ролика 4 з центром O_4 на осі обертання і через ущільнювальний ролик 3 з центром O_3 діє на ПР у точці C . Ця сила виконує важливу функцію в процесі формування ПР, особливо на етапі збільшення його діаметра. Через ущільнювальний ролик 3 з центром на осі обертання O_3 , сила F_3 створює тиск на рулон у точці контакту C , сприяючи ущільненню БССК у зовнішніх шарах рулону.

- G_0 – сили тяжіння, що діє на ПР.

- G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – сили тяжіння, що діють на ролики.

- $G_{O_1O_5}$ – сили тяжіння, що діють на важіль O_1O_5 .

- $G_{O_5O_4}$ – сили тяжіння, що діють на важіль O_5O_4 .

- $G_{O_1O_2}$ – сили тяжіння, що діють на важіль O_1O_2 .

- C_1, C_2, C_3 – жорсткості пружин, які формують сили F_1, F_2, F_3 відповідно.

- M, M_1 – точки контакту роликів O_3O_4, O_3O_5 .

- N_M – це нормальна сила, яка виникає у точці контакту між ущільнювальними роликами 4 і 3 з центрами O_4 і O_3 , передаючи зусилля на ПР через ущільнювальний ролик 3 з центром O_3 в точку контакту C .

Ця сила сприяє стабільності обертання рулону, створюючи тиск на БССК у зовнішніх шарах рулону. Вона також забезпечує необхідний рівень ущільнення, передаючи навантаження від пружини ущільнювального ролика 4 з центром O_4 на осі обертання через проміжний ущільнювальний ролик 3 з центром в т. O_3 .

N_{MI} – це нормальна сила яка виникає у точці контакту C між ущільнювальними роликами 5 і 3 з центрами O_5 і O_3 , передаючи зусилля на ПР через ущільнювальний ролик 3 в точку контакту. Ця сила виникає завдяки взаємодії пружини ущільнювального ролика з центром в т. O_5 , яка створює необхідний тиск на рулон через ролик 3.

В додатку Г наведені числові значення кутів, плечей сил і довжин елементів конструкції, для кожного з етапів формування ПР.

Для визначення залежності між силами, що діють на серцевину ПР та їхніми моментами потрібно скласти рівняння моментів сил відносно точок обертання роликів, для цього потрібно знайти складові нормальної сили N_A , N_B , N_C роликів у точках A , B , C контакту роликів з ПР. Для знаходження нормальної сили N_C потрібно врахувати, що на ущільнювальний ролик 3 діють ролики 4 та 5, що в свою чергу створюють нормальні сили N_M та N_{MI} на ролик 3. (рис. 2.6)

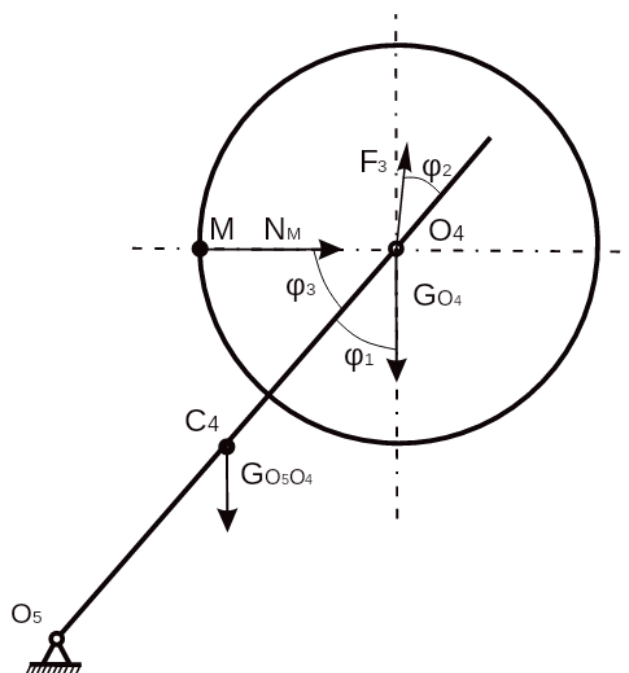


Рисунок 2.6 – Схема моментів сил відносно точки O_5

Рівняння моментів сил відносно точки O_5 , коли система (рис. 2,6) знаходиться в рівновазі та враховуючи, що $O_5C_4 = 0,5 \cdot O_5O_4$:

$$\sum_{k=1}^n M_{O_5}(\vec{F}_k) = -G_{O_5O_4} O_5C_4 \sin\varphi_1 - G_{O_4} O_5O_4 \sin\varphi_1 + F_3 O_5O_4 \sin\varphi_2 - N_M O_5O_4 \sin\varphi_3 = 0, \quad (2.1)$$

З рівняння моментів сил (2.1), записаного для рівноваги важеля O_5O_4 , визначається нормальна сила N_M , яка передається через ролик 3 з центром осі обертання O_3 та забезпечує необхідний рівень ущільнення рулону під час першого етапу його формування, отримаємо:

$$N_M = \frac{1}{\sin\varphi_3} F_3 \sin\varphi_2 - (0,5G_{O_5O_4} + G_{O_4}) \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_3}, \quad (2.2)$$

Враховуючи, що сила F_3 створюється пружиною ролика 4 рис. 2.5, вона визначається за законом Гука:

$$F_3 = C_3(l_3 - O_4C_3), \quad (2.3)$$

де: C_3 – жорсткість пружини ролика;

l_3 – довжина пружини до стиснення;

O_4C_3 – залишкова довжина після дії сили для пружини ролика 4.

Підставляючи силу пружності F_3 (2.3) у рівняння моментів сил (2.2) отримаємо:

$$N_M = C_3 (l_3 - O_4C_3) \frac{\sin\varphi_2}{\sin\varphi_3} - (0,5G_{O_5O_4} + G_{O_4}) \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_3}, \quad (2.4)$$

Отримане рівняння (2.4) для моменту N_M дозволяє визначити силу, яку створює ролик 4, щоб забезпечити рівновагу та стабільне ущільнення ПР. Рівняння враховує силу пружності F_3 , яка залежить від параметрів КПЗО та впливу самого ПР на систему.

Для визначення нормальної сили N_{M1} яка діє на ролик 3 (рис. 2.7), розглянемо систему важелів O_1O_5 і O_5O_4 , а також роликів 4 та 5 з центрами на їх осі обертання O_4 та O_5 відповідно (рис. 2.5, 2,7). У цій системі аналізуються всі діючі сили та їхні моменти, що впливають на рівновагу механізму та передачу навантаження між елементами пресувального засобу.

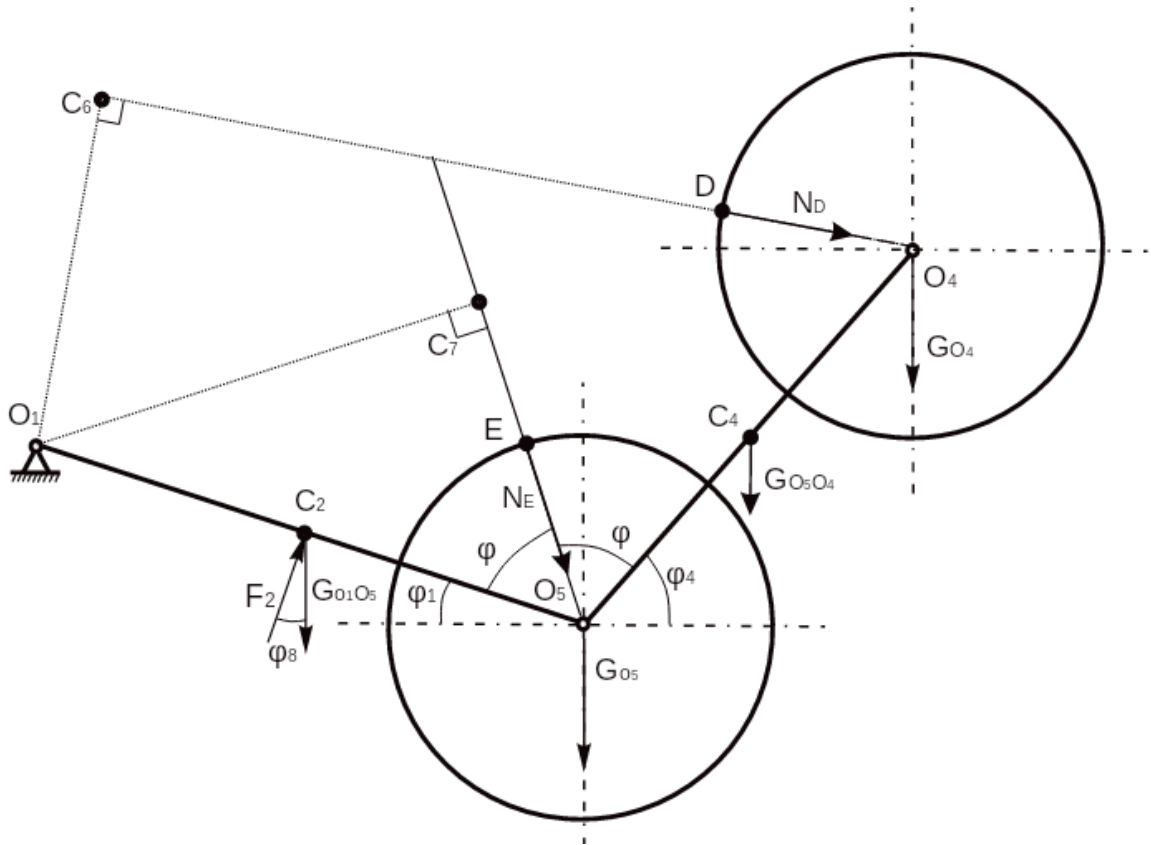


Рисунок 2.7 - Схема моментів сил відносно точки O_1

Для цього складемо рівняння моментів сил відносно точки O_1 :

$$\sum_{k=1}^n M_{O_1}(\vec{F}_k) = -G_{O_1O_5} \sin \varphi_5 \cdot O_1C_2 - G_{O_5} \sin \varphi_5 \cdot O_1O_5 + F_2 \sin \varphi_4 \cdot O_1C_2 -$$

$$- N_{M1} \sin \varphi_6 \cdot O_1O_5 - G_{O_5O_4} \cdot O_1K_3 - G_{O_4} \cdot O_1K_4 - N_M \cdot O_1K_6 = 0; \quad (2.5)$$

Враховуючи, що сила F_2 створюється пружиною ролика 5 рис. 2.8, вона визначається за законом пружності Гука:

$$F_2 = C_2 (l_2 - K_2 C_2), \quad (2.6)$$

де: C_2 – жорсткість пружини ролика;

l_2 – довжина пружини до стиснення;

$K_2 C_2$ – залишкова довжина після дії сили для пружини ролика O_4 .

Підставляючи силу пружності F_2 (2.6) у рівняння моментів сил (2.5) і враховуючи $O_1 O_5 = 2 O_1 C_2$, отримаємо:

$$N_{M1} = \frac{O_1 C_2 \sin \varphi_4}{O_1 O_5 \sin \varphi_6} [C_2 (l_2 - K_2 C_2)] - (G_{O_1 O_5} + G_{O_5} + G_{O_4}) \frac{O_1 C_2 \sin \varphi_5}{O_1 O_5 \sin \varphi_6} - \frac{G_{O_5 O_4} \cdot O_1 K_3 + G_{O_4} \cdot O_1 K_4}{O_1 O_5 \sin \varphi_6} - N_M \frac{O_1 K_6}{O_1 O_5 \sin \varphi_6}, \quad (2.7)$$

Отримане рівняння для сили N_{M1} дозволяє визначити силу, яку створює ролик 5, щоб забезпечити рівновагу та стабільне ущільнення ПР.

Для визначення нормальної сили N_C , яка діє на ПР, розглянемо важіль $O_2 O_3$ та ролик 3 (рис. 2.5, 2.8). У цій системі аналізуються всі діючі сили та їхні моменти, що впливають на рівновагу механізму та передачу навантаження між елементами пресувального пристрою.

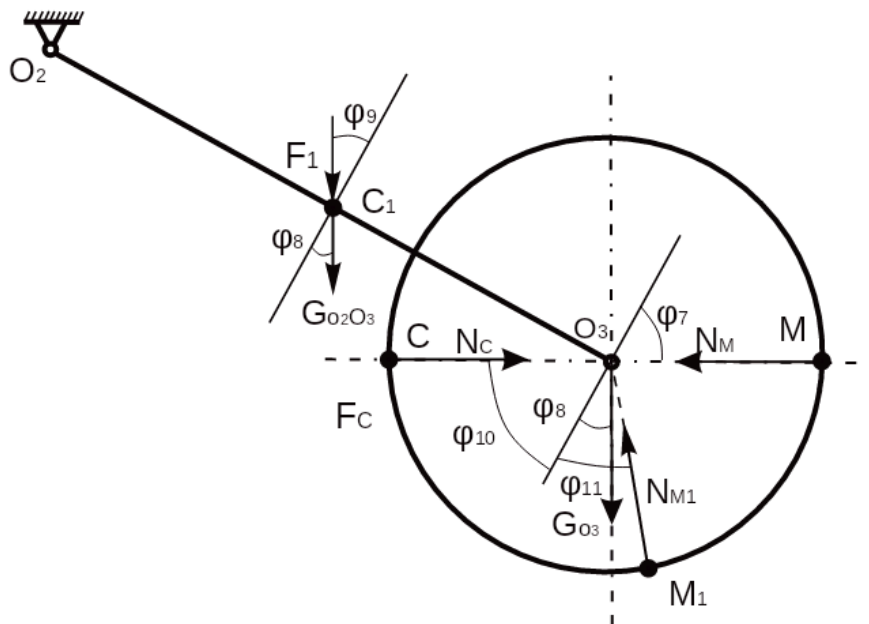


Рисунок 2.8 – Схема моментів сил відносно точки O_2

Для цього складемо рівняння моментів сил відносно точки O_2 :

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n M_{O_2}(\vec{F}_k) = & -G_{O_2O_3} \cos\varphi_8 \cdot O_2C_1 - F_1 \cos\varphi_9 \cdot O_2C_1 + \\ & + Nc \cos\varphi_{10} \cdot O_2O_3 - G_{O_3} \cos\varphi_8 O_2O_3 - N_M \cos\varphi_7 \cdot O_2O_3 + \\ & + N_{M_1} \cos\varphi_{11} \cdot O_2O_3 = 0, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Враховуючи, що сила F_1 створюється пружиною ролика 3 рис. 2.5, вона визначається за законом Гука:

$$F_1 = C_1 (l_1 - K_1C_1), \quad (2.9)$$

Підставляючи силу пружності F_1 (2.9) у рівняння моментів сил (2.8), а також врахувавши що важіль $O_2O_3 = 2O_2C_1$, отримаємо:

$$\begin{aligned} Nc = & (G_{O_3} + 0,5G_{O_2O_3}) \frac{\cos\varphi_8}{\cos\varphi_{10}} + C_1 (l_1 - K_1C_1) \frac{\cos\varphi_9}{2\cos\varphi_{10}} + \\ & + N_M \frac{\cos\varphi_7}{\cos\varphi_{10}} - N_{M_1} \frac{\cos\varphi_{11}}{\cos\varphi_{10}}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

Отримане рівняння (2.10) для нормальної сили N_C дозволяє визначити тиск, який передає ролик 3 на ПР у точці контакту C . Це рівняння враховує вплив сили тяжіння рулону G_0 , ваги конструктивних елементів механізму G_1 , а також сили пружини ролика F_1 . Додатково, воно відображає взаємодію між роликами та пресованим матеріалом.

Для визначення нормальних сил N_A та N_B , які діють у точках контакту між ПР та роликами 1 та 2 доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на координатні осі замість рівнянь моментів. Оскільки ролики 1 та 2 жорстко закріплені, для опису його рівноваги достатньо враховувати умови балансу сил у горизонтальному та вертикальному напрямках. Саме тому для знаходження N_A та N_B доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на осі X та Y , які дозволяють встановити

залежності між прикладеними навантаженнями та забезпечити коректне визначення жорсткості пружин:

по осі x :

$$\sum_{k=1}^n F_{kx} = N_A \sin\varphi_{13} + N_B \sin\varphi_{12} - N_C \sin\varphi_{14} = 0, \quad (2.11)$$

по осі y :

$$\sum_{k=1}^n F_{ky} = N_A \cos\varphi_{13} - N_B \cos\varphi_{12} - N_C \cos\varphi_{14} = G_0, \quad (2.12)$$

Враховуючи числові значення з таблиці Г.3, Г.4 для (2.5), (2.7), (2.10), (2.11), (2.12), отримаємо, нормальні сили N_M , N_{M1} , N_C , N_A , N_B для першого етапу формування ПР, дані які занесені у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Таблиця нормальних сил для першого етапу формування ПР

| | Позначення | Опис | Формула для розрахунку |
|---|------------|---|--|
| 1 | N_M | Нормальна сила, яка виникає у точці C контакту між роликами 4 і 3, передаючи зусилля на ПР через ролик 3 в точці контакту | $0,75 C_3 (l_3 - 0,215) - 0,78 (0,5G_{0_5 0_4} + G_{0_4})$ |
| 2 | N_{M1} | Нормальна сила, яка виникає у точці C контакту між роликами 5 і 3, передаючи зусилля на ПР через ролик 3 в точці контакту | $0,517 C_2 (l_2 - 0,452) - 1,863G_{0_1 0_5} - 2,642G_{0_5} - 0,563 N_M$ |
| 3 | N_C | Нормальна сила, що виникає в точці C контакту між ПР і роликом 3 | $1,718(G_{0_3} + 0,5 G_{0_2 0_3}) + 0,875C_1(l_1 - 0,551) + 0,916N_M - 1,535 N_{M1}$ |
| 4 | N_A | Нормальна сила, що виникає в точці контакту A між ПР і роликом 1 | $1,005N_C + 0,58 G_0$ |
| 5 | N_B | Нормальна сила, що виникає в точці контакту B між ПР і роликом 2 | $0,97N_C - 0,58 G_0$ |

На першому етапі формування ПР ключову роль у процесі ущільнення відіграють нормальні сили N_A , N_B , N_C які виникають у точках контакту рулону з роликами. Вони визначають рівень стискання біомаси та впливають на щільність рулону. Рівномірний розподіл нормальних сил забезпечує необхідну щільність ПР. Занадто малі значення N_A , N_B , N_C спричиняють пухкий ПР. Надмірні значення цих

сил можуть спричинити занадто сильне ущільнення, що впливає на процес формування і може призвести до підвищеного зносу механізму роликів.

Таким чином, на першому етапі формування ПР важливим є правильне налаштування нормальних сил, що забезпечує рівномірне ущільнення серцевини, середніх і зовнішніх шарів рулону. Для цього необхідно вибрати необхідну жорсткість та довжину пружин, силу взаємодії роликів та геометричні параметри механізму, що дозволить отримати рівномірний розподіл тиску й необхідну щільність рулону.

Другий етап формування. У цьому положенні ПР контактує з чотирма роликками, що забезпечують його стабілізацію та подальше ущільнення. Схема другого етапу формування ПР представлена на рис. 2.6.

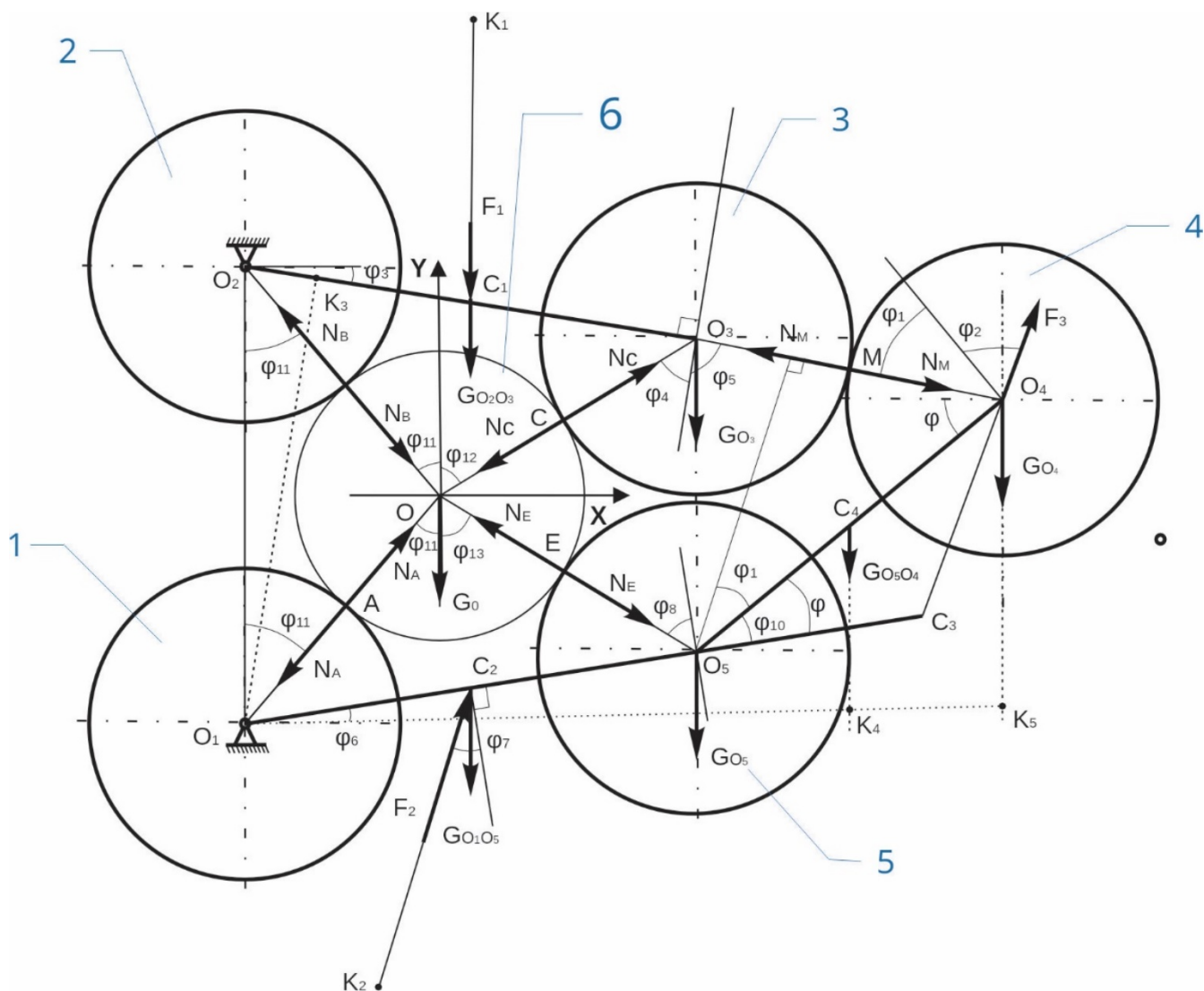


Рисунок 2.9 – Схема другого етапу формування ПР: 1, 2 – притискні (не рухомі) ролики; 3, 4, 5 – ущільнювальні (рухомі) ролики; 6 – ПР;

Для цього визначимо нормальні сили N_A , N_B , N_C , N_E , у точках A , B , C , E контакту з ПР (рис. 2.9, 2.10). Розпочнемо із знаходження нормальної сили N_C , яка виникає у точці контакту між роликami 3 та 4 з точками на осях обертання O_3 та O_4 відповідно. Варто зазначити, що для знаходження нормальної сили N_C потрібно врахувати що на ролик 3 діє нормальна сила N_M ролика з центром в т. O_4 . Для визначення нормальної сили N_M , розглядаємо рівновагу важеля O_5O_4 і ролика 4.

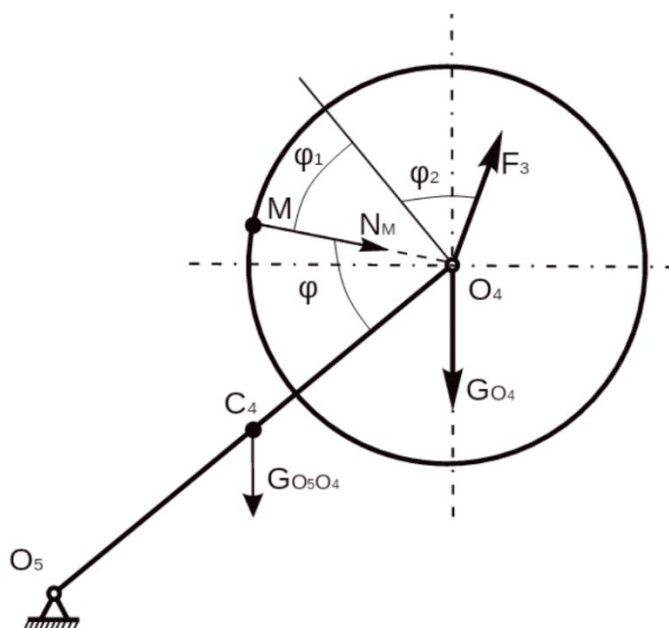


Рисунок 2.10 – Схема моментів сил відносно точки O_5

Складемо рівняння моментів сил відносно т. O_5 :

$$\sum_{k=1}^n M_{O_5}(F_k) = -G_{O_5O_4} \cdot O_5C_4 \cos\varphi - G_{O_4} \cdot O_5O_4 \cos\varphi - N_M \cos\varphi_1 \cdot O_5O_4 + F_3 \cos\varphi_2 \cdot O_5O_4 = 0. \quad (2.13)$$

Врахуємо, що відповідно до рис. 2.10, $O_5C_4 = 0.5 O_5O_4$, маємо:

$$0,5 G_{O_5O_4} \cdot \cos\varphi - G_{O_4} \cdot \sin\varphi - N_M \cdot \cos\varphi_1 + F_3 \cdot \cos\varphi_2 = 0. \quad (2.14)$$

Підставляючи силу пружності F_3 (2.3) у рівняння моментів сил (2.14) отримаємо:

$$N_M = \frac{1}{\cos\varphi_1} \cdot [C_3(l_3 - O_4C_3) \cdot \cos\varphi_2 - G_{O_4} - 0,5 G_{O_5O_4} \cos\varphi]. \quad (2.15)$$

Для визначення нормальної сили N_C , розглянемо рівновагу важеля O_2O_3 і ролика 3 (рис. 2.9, 2.11).

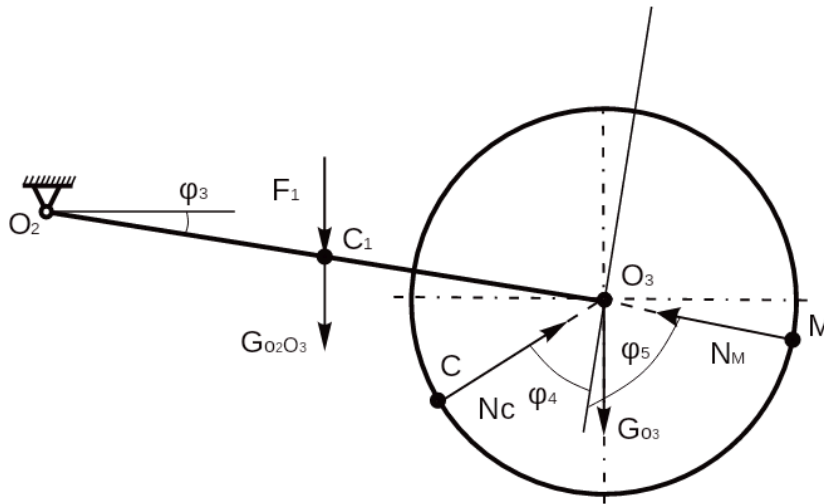


Рисунок 2.11 – Схема моментів сил відносно точки O_2

Складемо рівняння моментів сил O_2 :

$$\sum_{k=1}^n M_{O_2}(F_k) = -G_{O_3} \cdot O_2O_3 \cdot \cos\varphi_3 - G_{O_2O_3} \cdot O_2C_1 \cdot \cos\varphi_3 - F_1 \cdot O_2C_1 \cdot \cos\varphi_3 + \\ + N_C \cdot O_2O_3 \cdot \cos\varphi_4 + N_M \cdot O_2O_3 \cdot \cos\varphi_5 = 0. \quad (2.16)$$

Підставляючи силу пружності F_1 (2.9) у рівняння моментів сил (2.16), отримаємо:

$$N_C = \frac{G_{O_3} \cdot \cos\varphi_3 + 0,5 G_{O_3} \cdot \cos\varphi_3 + 0,5 C_1 \cdot (l_1 - K_1 C_1) \cdot \cos\varphi_3 - N_M \cdot \cos\varphi_5}{\cos\varphi_4}, \quad (2.17)$$

Для визначення нормальної сили N_E розглянемо рівновагу системи важелів O_1O_5 і O_5O_4 з роликками 5 і 4 (рис. 2.12)

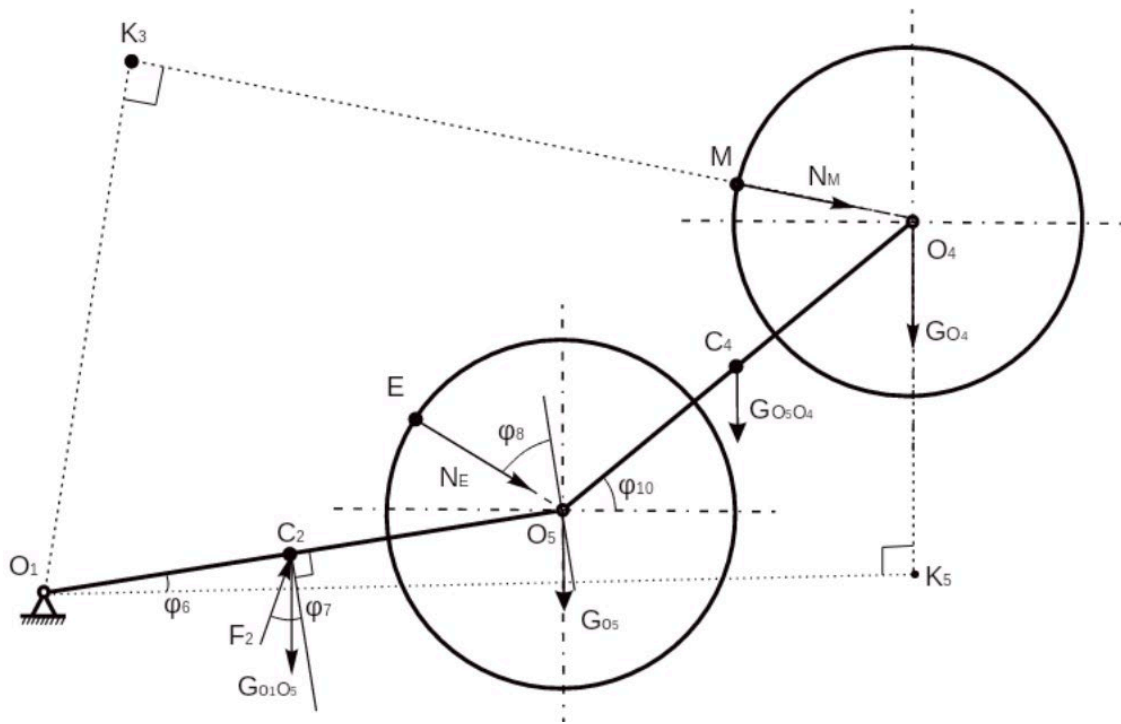


Рисунок 2.12 – Схема моментів сил відносно точки O_1

Складемо рівняння моментів сил відносно точки O_1 :

$$\sum_{k=1}^n M_{O_1}(F_k) = -G_{O_1O_5} \cdot O_1C_2 \cdot \cos\varphi_6 + F_2 \cdot \cos\varphi_7 \cdot O_1C_2 - G_{O_5} \cdot O_1O_5 \cdot \cos\varphi_6 -$$

$$- G_{O_5O_4} \cdot (O_1C_2 \cdot \cos\varphi_6 + O_5C_4 \cdot \cos(\varphi_6 + \varphi_{10})) -$$

$$- G_{O_4} \cdot (O_1C_2 \cdot \cos\varphi_6 + O_5O_4 \cdot \cos(\varphi_6 + \varphi_{10})) -$$

$$- N_E \cdot \cos\varphi_8 \cdot O_1O_5 - N_M \cdot O_1K_3 = 0 \quad (2.18)$$

Якщо поділити (2.18) на $O_1O_5 = O_4O_5 = 2 O_5C_4$ та врахувати, що сила пружності $F_2 = C_2 (l_2 - K_2C_2)$, отримаємо:

$$-(G_{O_5} + 0,5 G_{O_1O_5}) \cos\varphi_6 + C_2(l_2 - K_2C_2) \frac{\cos\varphi_7}{2} - (G_{O_5} + 0,5 G_{O_1O_5}) \cos\varphi_6 -$$

$$-(G_{O_5} + 0,5 G_{O_1O_5}) \cos(\varphi_6 + \varphi_{10}) - N_E \cos\varphi_8 - N_M \frac{O_1K_3}{O_1O_5} = 0$$

Тоді:

$$N_E = - \frac{(G_{O_5} + 0,5G_{O_1O_5}) \cdot (2 \cdot \cos\varphi_6 + \cos(\varphi_6 + \varphi_{10}))}{\cos\varphi_8} + C_2(l_2 - K_2C_2) \frac{\cos\varphi_7}{2 \cdot \cos\varphi_8} + N_M \frac{O_1K_3}{O_1O_5 \cdot \cos\varphi_8} \quad (2.19)$$

Для визначення нормальних сил N_A та N_B , які діють у точках контакту між ПР та роликами 1 та 2 доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на координатні осі замість рівнянь моментів. Оскільки ролики 1 та 2 жорстко закріплені, для опису його рівноваги достатньо враховувати умови балансу сил у горизонтальному та вертикальному напрямках. Саме тому для знаходження N_A та N_B доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на осі X та Y , які дозволяють встановити залежності між прикладеними навантаженнями та забезпечити коректне визначення жорсткості пружин:

по осі x :

$$\sum_{k=1}^n F_{kx} = N_A \cdot \sin\varphi_{11} + N_B \cdot \sin\varphi_{11} - N_C \cdot \sin\varphi_{12} - N_E \cdot \sin\varphi_{13} = 0 \quad (2.20)$$

по осі y :

$$\sum_{k=1}^n F_{ky} = N_A \cdot \cos\varphi_{11} - N_B \cdot \cos\varphi_{11} - N_C \cdot \cos\varphi_{12} + N_E \cdot \cos\varphi_{13} - G_0 = 0 \quad (2.21)$$

Враховуючи числові значення з таблиць Г.5, Г.6 для (2.15), (2.17), (2.19), (2.20), (2.21), отримаємо нормальні сили N_M , N_C , N_E , N_A , N_B для другого етапу формування ПР, дані про які занесені у таблицю 2.4.

На другому етапі формування паливного рулону (ПР) процес ущільнення та стабілізації матеріалу відбувається внаслідок контакту рулону з чотирма роликами. У цьому положенні визначальними факторами є нормальні сили N_A , N_B , N_C , N_E , які діють у точках контакту A , B , C та E .

Збалансоване співвідношення нормальних сил N_A , N_B , N_C , N_E дозволяє досягти рівномірного ущільнення рулону та стабільності його форми на проміжному етапі формування. Оптимальні значення цих сил забезпечують необхідну щільність рулону без ризику надмірного або недостатнього пресування. Для цього важливо

коригувати параметри жорсткості пружин, силу взаємодії роликів та геометричні параметри механізму.

Таблиця 2.4 – Таблиця нормальних сил для другого етапу формування ПР

| | Позначення | Опис | Формула для розрахунку |
|---|------------|---|--|
| 1 | N_M | Нормальна сила, яка виникає у точці C контакту між роликами 4 і 3, передаючи зусилля на ПР через ролик 3 в точці контакту | $0,649 C_3 (l_3 - 0,148) - 1,291G_{O_4} - 0,498G_{O_5O_4}$ |
| 2 | N_C | Нормальна сила в точці C контакту між ПР і роликом 3 | $1,518 (G_{O_3} + 0,5G_{O_2O_3}) + 0,759C_1(l_1 - 0,507) - 0,058N_M$ |
| 3 | N_E | Нормальна сила в точці E контакту між ПР і роликом 5 | $- 4,242 \cdot (G_{O_5} + 0,5G_{O_1O_5}) + 1,388 \cdot C_2 \cdot (l_2 - 0,494) + 1,529N_M$ |
| 4 | N_A | Нормальна сила в точці A контакту між ПР і роликом 1 | $1,001N_C + 0,319N_E + 0,656G_0$ |
| 5 | N_B | Нормальна сила в точці B контакту між ПР і роликом 2 | $0,316N_C + 1,001N_E - 0,656G_0$ |

Третій етап формування передбачає аналіз геометричних і механічних характеристик механізму, де ПР контактує з п'ятьма роликами, що забезпечує рівномірне ущільнення матеріалу та досягнення необхідної щільності. Схема третього етапу формування ПР представлена на рис. 2.13. Для знаходження сил взаємодії роликів з першого по п'ятий з паливним рулоном 6 в точках A, B, C, D, E (рис. 2.13), необхідно скласти рівняння рівноваги для системи. В цьому випадку основною метою є визначення значень нормальних сил N_A, N_B, N_C, N_D, N_E .

Для визначення нормальної сили N_C розглядаємо рівновагу важеля O_2O_3 та ролика 3. Складемо рівняння моментів для важеля O_2O_3 та ролика 3:

$$\sum_{k=1}^n M_{O_2}(\vec{F}_k) = -F_1 \cdot O_2C_1 \cos\varphi_1 - G_{O_2O_3} \cdot O_2C_1 \cos\varphi_1 - G_{O_3} \cdot O_2O_3 \cos\varphi_1 + N_C \sin\varphi \cdot O_2O_3 = 0 \quad (2.22)$$

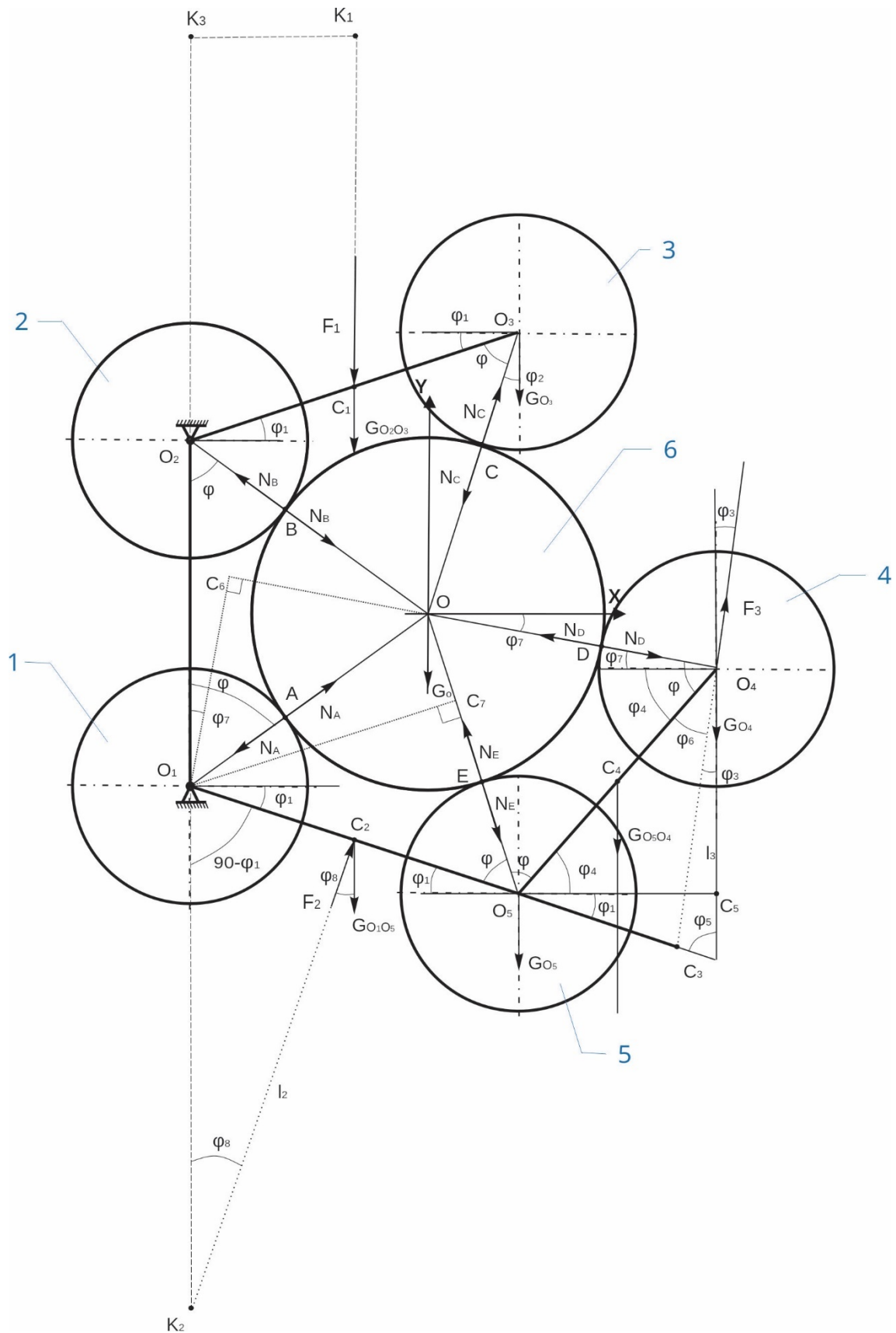


Рисунок 2.13 – Схема третього етапу формування ПР: 1, 2 – притискні (не рухомі) ролики; 3, 4, 5 – ущільнювальні (рухомі) ролики; 6 – ПР

Підставляючи силу пружності F_1 (2.9) та враховуючи, що $O_2C_1 = 0,5 O_2O_3$ отримаємо:

$$-C_1(l_1 - K_1C_1) - G_{O_2O_3} - 2 G_{O_3} + 2Nc \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi_1} = 0$$

Отже:

$$N_C = \frac{C_1(l_1 - K_1C_1) + G_{O_2O_3} + 2 G_{O_3}}{2 \sin\varphi} \cos\varphi_1$$

Для визначення нормальної сили N_D розглянемо рівновагу моментів сил для важеля O_5O_4 і ролика 4, відносно точки O_5 (рис. 2.13).

Для визначення нормальної сили N_D складемо рівняння моментів сил для важеля O_5O_4 і ролика 4, відносно точки O_5 :

$$\sum_{k=1}^n M_{O_5}(\vec{F}_k) = -N_D \cdot \sin\varphi \cdot O_5O_4 - G_{O_5O_4} \cdot O_5O_4 \cdot 0,5 \cdot \cos\varphi_4 - \\ - G_{O_4} \cdot O_5O_4 \cdot \cos\varphi_4 + F_3 \sin\varphi_6 O_5O_4 = 0 \quad (2.23)$$

Підставимо силу пружності $F_3 = C_3(l_3 - O_4C_3)$ у рівняння моментів сил (2.23) та скоротимо все на O_5O_4 , отримаємо:

$$N_D \frac{1}{\sin\varphi} (C_2(l_3 - O_4C_3) \sin\varphi_6 - 0,5 G_{O_5O_4} \cos\varphi_4 + G_{O_4} \cos\varphi_4) = 0$$

Кут $\angle O_4O_5O_4 = \varphi$ так як трикутники $\triangle O_4O_5O_3$; $\triangle O_4O_5O_2$; $\triangle O_4O_5O_3$; $\triangle O_4O_5O_1$ рівні між собою. Визначимо φ_4 , φ_6 , O_4C_3 . Враховуючи симетричність розташування роликів 1, 2, 3, 4, 5 відносно горизонтальної осі, що проходить через умовну центральну вісь ПР, визначимо кути φ_1 біля точок O_1 і O_5 . Звідси $\varphi_4 = 180^\circ - 2\varphi - \varphi_1$.

φ_6 визначаємо з теореми синусів, трикутник $\Delta O_5 C_3 O_4$:

$$\frac{O_5 C_3}{\sin \varphi_6} = \frac{O_4 C_3}{\sin(\varphi_4 + \varphi_1)}$$

Тоді,

$$O_4 C_3 = \sqrt{O_5 C_3^2 + O_5 O_4^2 - 2 O_5 C_3 \cdot O_5 O_4 \cos(\varphi_4 + \varphi_1)}$$

Враховуючи числові значення з таблиць Г5, Г6 для N_D (2.23), отримаємо:

$$N_D = \frac{0,409 C_3 (l_3 - 0,285) - 0,588 (0,5 G_{O_5 O_4} + G_{O_4})}{0,809}$$

Для визначення нормальної сили N_E складемо рівняння моментів сил розглянувши систему важелів разом з роликками 4 та 5 (рис. 2.14). Складемо рівняння моментів сил відносно точки O_1 (2.24):

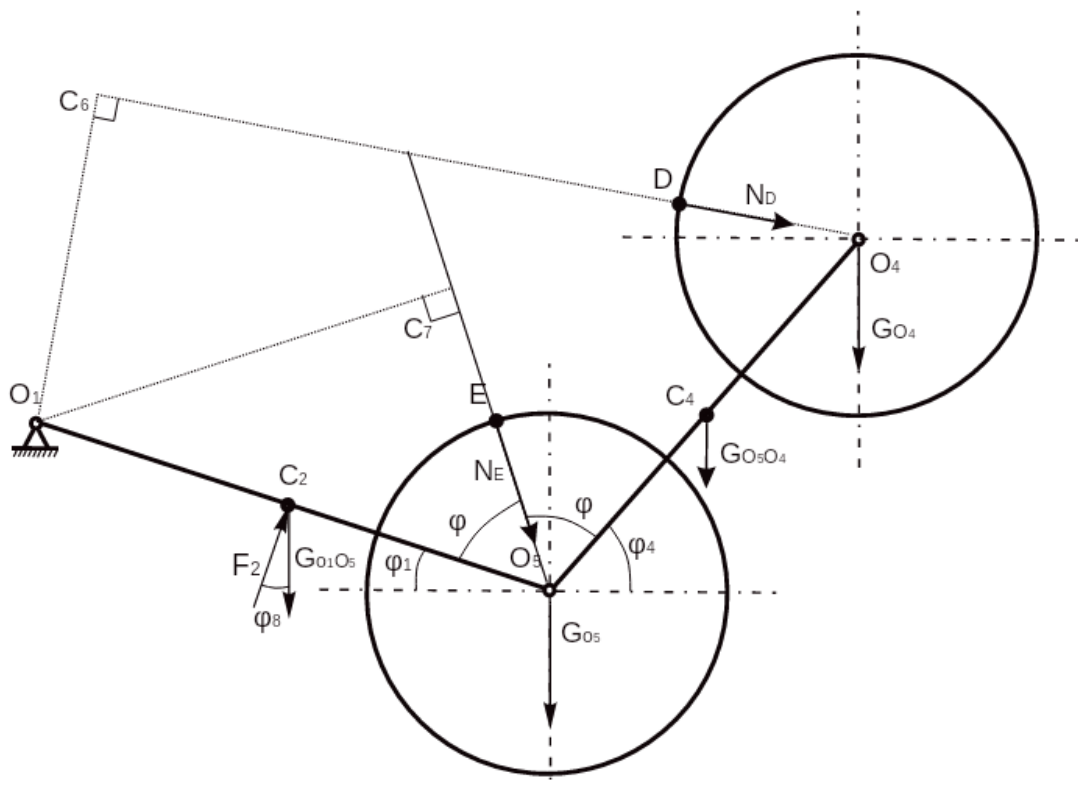


Рисунок 2.14 – Схема моментів сил відносно точки O_1

$$\sum_{k=1}^n M_{O_1}(\vec{F}_k) = -G_{O_1O_5} \cdot O_1C_2 \cos \varphi_1 - G_{O_5} \cdot O_1O_5 \cos \varphi_1 -$$

$$- G_{O_5O_4} (O_1O_5 \cos \varphi + O_5C_4 \cos \varphi_4) - G_{O_4} (O_1O_5 \cos \varphi + O_5O_4 \cos \varphi_4) - N_E \cdot O_1C_7 -$$

$$N_D \cdot O_1C_6 + F_2 \cdot O_1C_2 \cdot \cos (\varphi_8 - \varphi_1) = 0 \quad (2.24)$$

Визначимо невідомі геометричні величини: $O_1C_7 = O_1O_5 \sin \varphi$; $O_1C_6 = O_1O \cos (\varphi - \varphi_7)$; $\varphi_7 = \varphi - \varphi_4$; $O_1C_6 = 0,25 \cos (\varphi - \varphi + \varphi_4) = 0,25 \cos \varphi_4$

Тоді:

$$K_2C_2 = \sqrt{O_1K_2^2 + O_1C_2^2 - 2O_1K_2 O_1C_2 \cos(90 - \varphi_1)}$$

Отже,

$$\frac{O_1C_2}{\sin \varphi_8} = \frac{K_2C_2}{\sin(90 - \varphi_1)}$$

Отже:

$$\varphi_8 = \arcsin \frac{O_1C_2}{K_2C_2} \sin(90 - \varphi_1)$$

Підставимо в 2.24 знайдені величини, числові значення із додатків Г5, Г6 та врахуємо, що сила пружності $F_2 = C_2 (l_2 - K_2C_2)$, отримаємо:

$$N_E = 0,999 \cdot C_2 (l_2 - 0,428) - 1,678 G_{O_5O_4} - 0,618 \cdot N_D - 2,628 \cdot G_{O_4}$$

Для визначення нормальних сил N_A та N_B , які діють у точках контакту між ПР та роликами 1 та 2 доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на координатні осі замість рівнянь моментів. Оскільки ролики 1 та 2 жорстко закріплені, для опису його рівноваги достатньо враховувати умови балансу сил у горизонтальному та

вертикальному напрямках. Саме тому для знаходження N_A та N_B доцільно використовувати рівняння проєкцій сил на осі X (2.25) та Y (2.26), які дозволяють встановити залежності між прикладеними навантаженнями та забезпечити коректне визначення жорсткості пружин:

по осі x :

$$\sum_{k=1}^n F_{kx} = N_A \cdot \sin\varphi + N_B \cdot \sin\varphi - N_C \cdot \cos(\varphi + \varphi_1) - N_E \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) - N_D \cdot \cos\varphi_7 = 0, \quad (2.25)$$

по осі y :

$$\sum_{k=1}^n F_{ky} = N_A \cdot \cos\varphi - N_B \cdot \cos\varphi - N_C \cdot \sin(\varphi + \varphi_1) + N_E \cdot \sin(\varphi + \varphi_1) + N_D \cdot \sin\varphi_7 - G_0 = 0. \quad (2.26)$$

Враховуючи числові значення з таблиць Г5, Г6 для (2.22), (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), отримаємо нормальні сили N_C , N_D , N_E , N_A , N_B для третього етапу формування ПР, дані які занесені у таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 - Таблиця нормальних сил для третього етапу формування ПР

| | Позначення | Опис | Формула для розрахунку |
|---|------------|--|---|
| 1 | N_C | Нормальна сила, що виникає в точці контакту C між ПР і роликом 3 | $\frac{C_1(l_1 - K_1C_1) + 2G_{O_3} + G_{O_2O_3}}{1,901}$ |
| 2 | N_D | Нормальна сила, що виникає в точці контакту D між ПР і роликом 4 | $\frac{0,409 C_3(l_3 - 0,285) - 0,588 (0,5G_{O_5O_4} + G_{O_4})}{0,809}$ |
| 3 | N_E | Нормальна сила, що виникає в точці контакту E між ПР і роликом 5 | $0,999 \cdot C_2(l_2 - 0,428) - 1,678 G_{O_5O_4} - 0,618 \cdot N_D - 2,628 \cdot G_{O_4}$ |
| 4 | N_A | Нормальна сила, що виникає в точці контакту A між ПР і роликом 1 | $N_C - 0,617N_E - 0,326N_D + 0,85G_0$ |
| 5 | N_B | Нормальна сила, що виникає в точці контакту B між ПР і роликом 2 | $N_E - 0,61 - N_C + 1,051N_D - 0,85G_0$ |

Підбір параметрів. В результаті розрахунків по трьох положеннях механізму, отримали 15 рівнянь (табл. 2.3, 2,4, 2,5) в яких представлені залежності сил, які

діють на ПР з боку роликів, від довжини та жорсткості пружин, що притискають ролики до ПР.

Враховуючи, що кожен з трьох етапів по 5 рівнянь містить 6 невідомих, то задача може бути розв'язана шляхом параметричного підбору значень (жорсткостей C і довжин пружин, l) за допомогою програми Mathcad враховуючи залежності сил, які діють на ПР з боку роликів в кожному з трьох етапів формування. Результати підбору раціональних параметрів наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Раціональні параметри пружин у КПЗО

| | Пружин 1 | Пружин 2 | Пружин 3 | Щільність ПР ρ , кг/м ³ |
|-------------------------|----------|----------|----------|---|
| Жорсткість C , Н/м | 2100,0 | 3500,0 | 2500,0 | 80,1 |
| Довжина пружини l , м | 0,8 | 0,8 | 0,4 | |
| Жорсткість C , Н/м | 2800,0 | 4200,0 | 3200,0 | 97,0 |
| Довжина пружини l , м | 0,8 | 0,8 | 0,4 | |
| Жорсткість C , Н/м | 3500,0 | 4500,0 | 4000,0 | 111,1 |
| Довжина пружини l , м | 0,8 | 0,8 | 0,4 | |
| Жорсткість C , Н/м | 3800,0 | 5000,0 | 4500,0 | 120,8 |
| Довжина пружини l , м | 0,8 | 0,8 | 0,4 | |
| Жорсткість C , Н/м | 4550,0 | 5750,0 | 5350,0 | 139,3 |
| Довжина пружини l , м | 0,8 | 0,8 | 0,4 | |

Необхідна щільність ПР досягається за рахунок рівномірного розподілу нормальних сил, що діють на рулон з боку роликів, а також правильного налаштування жорсткості та довжини пружин у механізмі. На кожному етапі формування рулону тиск роликів забезпечує його ущільнення: спочатку формується серцевина, потім стабілізуються середні шари, а на завершальному етапі ущільнюється зовнішня структура рулону. Використання рівнянь рівноваги моментів сил і нормальних реакцій дозволяє визначити необхідний тиск для притискних роликів, що гарантує необхідне ущільнення. Параметричний підбір значень жорсткості та довжин пружин сприяє стабільному контакту роликів з рулоном протягом усього процесу, забезпечуючи рівномірний тиск на рулон і

запобігаючи його деформації або надмірному ущільненню. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні значення жорсткості пружин і сили притискання роликів, необхідні для формування ПР із щільністю в межах 80,1–139,3 кг/м³. Зокрема, досліджено, що при мінімальній щільності $\rho = 80,1$ кг/м³ рекомендовано використовувати жорсткості пружин $C_1 = 2100$ Н/м, $C_2 = 3500$ Н/м, $C_3 = 2500$ Н/м, а усереднена сила притискання має становити 1353 Н. Для досягнення максимальної щільності $\rho = 139,3$ кг/м³ доцільно застосовувати жорсткості $C_1 = 4550$ Н/м, $C_2 = 5750$ Н/м, $C_3 = 5350$ Н/м при усередненій силі 2684 Н, довжини пружин – 0,8 м, 0,8 м, 0,4 м відповідно. Таким чином, щільність рулонів регулюється зміною натягу (жорсткості) пружин. Менший попередній натяг пружин дає легші рулони (ρ ближче до 80 кг/м³), тоді як більша – щільніші (ρ до 140 кг/м³).

2.5 Залежність частоти обертання компактного паливного рулону від його діаметра під час формування

Однією з ключових кінематичних характеристик формування компактних паливних рулонів є частота їхнього обертання у пресувальній камері. Щоб забезпечити сталість швидкості подачі та ущільнення біомаси в рулон, частота обертання повинна автоматично зменшуватись зі збільшенням радіуса рулону. Це необхідно для забезпечення рівномірного пресування в камері змінного об'єму. Частота залежить від точкового радіуса рулону R , що змінюється у процесі його ущільнення та намотування. За умови постійної лінійної швидкості поверхні рулону u , м/с, частота обертання n визначається за формулою:

$$n = \frac{u}{2\pi R} * 60$$

де R – поточний радіус рулону, м

Таким чином, чим більшим стає діаметр рулону, тим нижчою є його частота обертання за умови сталої u . Згідно з технічними параметрами рулонів на кожній стадії формування (табл. 2.7) можна розрахувати частоту обертання рулону у відповідності до зміни діаметру (табл. 2.8)

Таблиця 2.7 – Параметри ПР

| | Діаметр, см | Довжина, см | Вага, кг |
|-------------|-------------|-------------|----------|
| ПР (1 етап) | 14,0 | 50 | 2,1 |
| ПР (2 етап) | 18,5 | 50 | 3,8 |
| ПР (3 етап) | 30,0 | 50 | 9,9 |

Таблиця 2.8 – Частота обертання рулона, об/хв

| Діаметр ПР, мм | Радіус ПР, м | Частота, об/хв |
|----------------|--------------|----------------|
| 100 | 0,050 | 57,30 |
| 150 | 0,075 | 38,20 |
| 200 | 0,100 | 28,65 |
| 250 | 0,125 | 22,92 |
| 300 | 0,150 | 19,10 |
| 350 | 0,175 | 16,37 |
| 400 | 0,200 | 14,32 |
| 450 | 0,225 | 12,73 |
| 500 | 0,250 | 11,46 |

За діаметра рулону 100 мм його частота обертання становить понад 57 об/хв, що відповідає початковій стадії формування.

У міру збільшення рулону (до 500 мм) частота обертання зменшується майже у 5 разів – 11,46 об/хв. Такий характер зміни свідчить про гіперболічну залежність між діаметром рулону та його обертальною частотою (рис. 2.15).

Зменшення частоти відбувається поступово, що необхідно враховувати під час проектування системи приводу, яка має забезпечити рівномірне ущільнення біомаси по всій товщині рулону. На графіку, побудованому за цими значеннями, чітко простежується гіперболічна залежність. У процесі намотування початкова частота обертання становить більш ніж 57 об/хв, а на етапі завершення формування рулону скорочується до близько 11,5 об/хв. Це вимагає від привідної системи автоматичного або ступеневого регулювання частоти обертання валів.

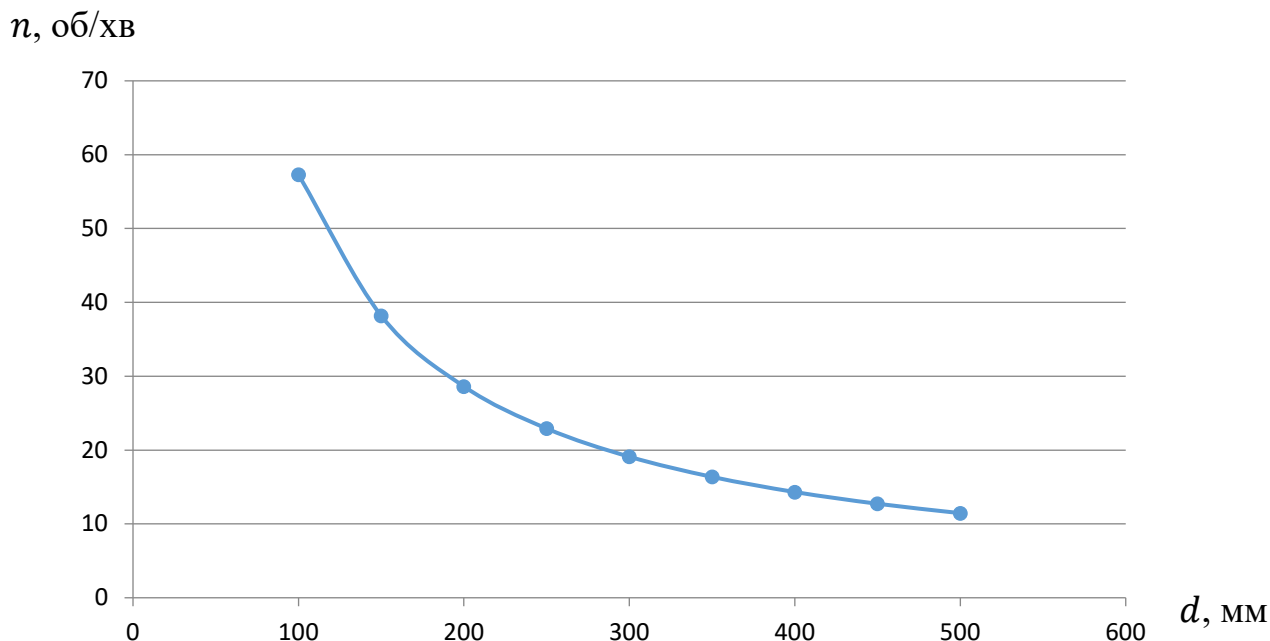


Рисунок 2.15 – Зміна частоти обертання паливного рулону залежно від його діаметра

Аналіз зміни частоти обертання паливного рулону залежно від його діаметра показав, що для забезпечення стабільної подачі й рівномірного ущільнення біомаси в процесі формування рулону необхідно здійснювати динамічне регулювання швидкості обертання. Отримана гіперболічна залежність підтверджує доцільність застосування автоматизованої або програмованої системи керування приводом, здатної адаптувати частоту обертання до зміни геометричних параметрів рулону. Це сприяє підвищенню якості ущільнення, структурної цілісності паливного рулону та ефективності роботи пресувального обладнання в цілому.

2.6 Пропозиції вдосконалення засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур та способу збирання

2.5.1. Пропозиція удосконалення камери пресування. Для виготовлення ПР з БССК, а саме з соломи льону та колосових зернових, потрібно забезпечити безперервний процес. КПЗО (рис. 2.16) для виготовлення ПР з БССК, а саме з льону та пшениці встановлюється стаціонарно, містить: дві нескінченних транспортерних стрічки 2, одна з яких подає матеріал 3 в робочу камеру, а інша – виконує роль

транспортування готових ПР; п'яти роликів (вальців) 4; підпружинених рамок 5; гідроциліндра 6, що при готовності ПР 7 – опускає 2 ролики, що, в свою чергу, дозволяє звільнити камеру для початку скручування наступного; обмежувальної планки 8; пружин стиску 9 які забезпечують необхідну щільність ПР; електродвигуна 10, що приводить в рух вальці та транспортерну стрічку за допомогою клинових пасів 11.

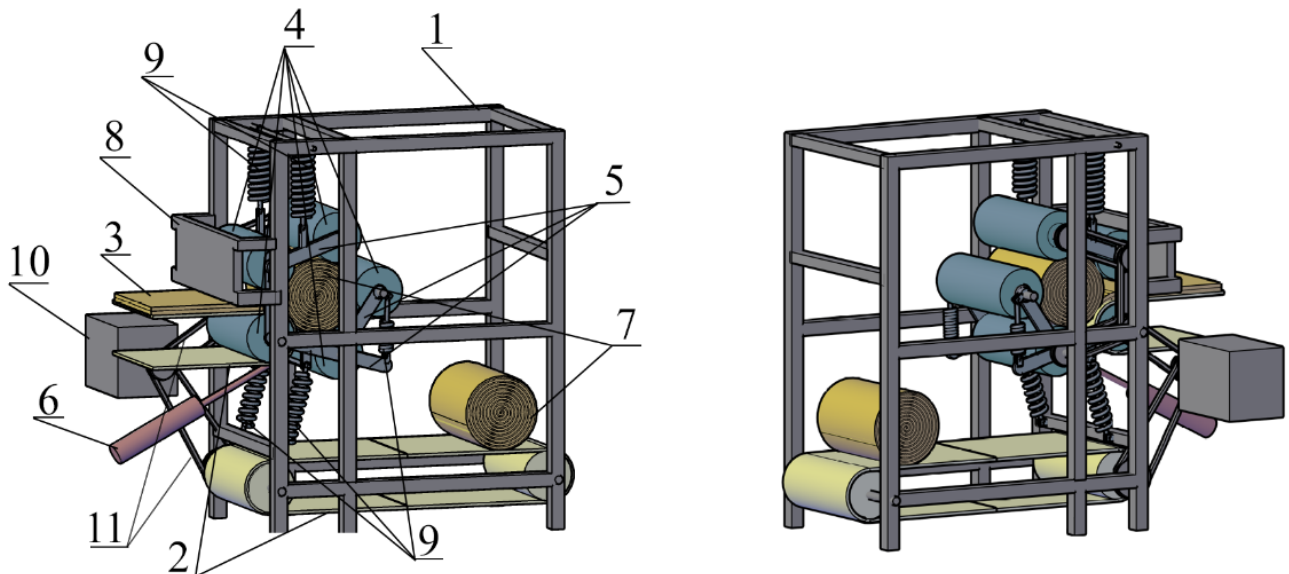


Рисунок 2.16 – КПЗО для виготовлення ПР: а – вид спереду, б – вид ззаду, 1 – рама, 2 - транспортерна стрічка, 3 - БССК, 4 – ролики, 5 – підпружинені рамки, 6 – гідроциліндр, 7 - ПР, 8 – обмежувальна планка, 9 – пружини стиску, 10 – електродвигун, 11 – клинові паси

Перевагами запропонованої конструкції:

1. Безперервний процес формування ПР за рахунок наявності двох нескінченних стрічок для подачі матеріалу в КПЗО та транспортування готових виробів;
2. Ефективне ущільнення біомаси. КПЗО ефективно вирішує проблему зменшення еластичності БССК, створюючи компактні та щільні ПР;

3. Регульована щільність. Пружини стиску забезпечують гнучкість контролю сили ущільнення, що дозволяє виготовляти ПР необхідної щільності;

4. Мінімальний вільний простір між роликками на початку скручування дозволяє сформувати ПР з перших обертів роликків;

5. Стаціонарне обладнання забезпечує вищу стабільність процесу виробництва, дозволяє використовувати додаткові механізми для пресування та пакування, а також уникнути витрат на транспортування великих агрегатів до поля.

З огляду на вище зазначене запропонована конструкція КПЗО забезпечує безперервний процес формування ПР із БССК.

2.5.2. Пропозиція вдосконалення способу збирання біомаси стебел сільськогосподарських культур. Недоліком зернових комбайнів, прес-підбирачів, підбирачів подрібнювачів є неможливість залишати певну частину БССК у полі, вся маса або подрібнюється й залишається в полі або збирається прес-підбирачами. Тому для розв'язання цієї задачі запропоновано підбирач-подрібнювач з розгалужувальним пристроєм (рис. 2.17), який частину БССК залишає у полі, а решту збирає в причіп. Для вдосконалення обрано підбирач-подрібнювач Ozen (Турція) [91] або подрібнювач УМС (Україна) [92].

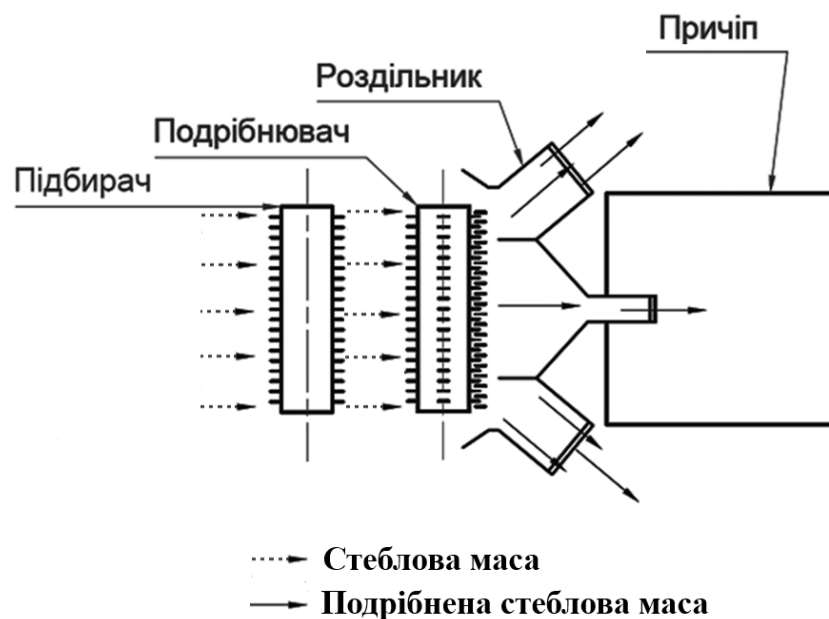


Рисунок 2.17 – Схема підбирача-подрібнювача з розгалужувальним пристроєм

На рис. 2.18 схематично зображено технологічну схему роботи підбирача-подрібнювача з установленим розподільником біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК). Процес відбувається таким чином: підбирач піднімає та подає стебла у подрібнюючий механізм, після чого подрібнена маса на високій швидкості спрямовується до трьох виходів розподільного механізму. Два з них призначені для розподілу стебел безпосередньо на поле, а третій – у вивантажувальну трубу, через яку частина подрібненої маси потрапляє у причіп. Завдяки удосконаленню конструкції підбирача-подрібнювача, що передбачає наявність трьох розгалужень розподільника, забезпечується можливість вибіркового збирання частини БССК. Такий підхід дозволяє одночасно залишати частину подрібненої біомаси на полі для повернення поживних речовин у ґрунт, а іншу частину – спрямовувати на збирання для подальшого використання, зокрема як сировини для виготовлення паливних матеріалів.

Висновки до розділу 2

На основі наведених у цьому розділі результатів теоретичних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що найдоцільнішими для енергетичного використання залишками біомаси є стебла колосових, луб'яних та олійних культур. Запропонована класифікація БССК дозволяє визначити придатність сировини до перероблення на паливні рулони, брикети або гранули. Стеблова біомаса має високу технологічну доступність і оптимальні властивості для ущільнення. Врахування морфології стебел сприяє оптимізації збирання та переробки. Це формує основу для вибору виду палива й засобу його формування.

2. Розроблена класифікація видів палива із БССК дозволила зробити висновок, що з первинної біомаси раціонально виготовляти ПР, тоді як вторинну – подрібнювати та виготовляти ПБ. Для виробництва ПР та ПБ основними операціями оброблення для біомаси залишків сільськогосподарських культур, є: подрібнення, скручування, ущільнення, пресування.

3. Встановлено, що найбільш раціональним способом переробки біомаси стебел сільськогосподарських культур є формування паливних рулонів у камері пресування змінного об'єму, яка забезпечує ущільнення біомаси до щільності 80–140 кг/м³ при дотриманні геометричних розмірів рулону, сумісних із котлами типу KALVIS–400. Процес формування паливного рулону складається з трьох етапів: формування щільної серцевини, подальше ущільнення із зростаючим зусиллям від пружин та завершальне обтискання сформованого паливного рулону усіма роликками і залежить від дії притискних роликів та величини нормальних сил. Щільність рулону прямо пропорційна зусиллям ущільнення, створюваним підпружиненими роликками.

4. У результаті дослідження процесу формування паливного ПР у КПЗО для кожного етапу було визначено рівняння моментів сил, що дозволило встановити залежності між ущільненням БССК та геометрично-силовими параметрами механізму КПЗО. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні значення жорсткості пружин і сили притискання роликів, необхідні для формування ПР із щільністю в межах 80,1–139,3 кг/м³. Зокрема, досліджено, що при мінімальній щільності $\rho = 80,1$ кг/м³ рекомендовано використовувати жорсткості пружин $C_1 = 2100$ Н/м, $C_2 = 3500$ Н/м, $C_3 = 2500$ Н/м, а сила притискання має становити 1353 Н. Для досягнення максимальної щільності $\rho = 139,3$ кг/м³ доцільно застосовувати жорсткості $C_1 = 4550$ Н/м, $C_2 = 5750$ Н/м, $C_3 = 5350$ Н/м при силі 2684 Н.

5. Запропонована конструкція КПЗО забезпечує безперервний процес формування ПР за рахунок двох нескінченних стрічок для подачі матеріалу в КПЗО та транспортування готових ПР.

6. Запропоноване удосконалення процесу збирання БССК, що полягає у забезпеченні можливості збирати певну частину БССК за рахунок розміщення за подрібнювальним механізмом підбирача-подрібнювача трьох розгалужень розподільника, два з яких будуть відводити подрібнену масу у поле, третій – буде відводити подрібнену масу в причіп для її збору та подальшого використання. Залишення частини подрібненої БССК дозволяє повертати в ґрунт поживні речовини.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Експериментальне устаткування для проведення досліджень

Для експериментального дослідження процесу подрібнення, руйнування, деформації, зміни пружних властивостей БССК приймали модель стебла пшениці озимої, льону олійного та льону-довгунця.

Для дослідження характеристик БССК, ПР та ПБ використовували стандартні і спеціально виготовлені прилади та устаткування. Зокрема: ваги лабораторні ТВЕ-0,5; лабораторний стенд для визначення зусилля різання стебел; сушильна шафа для висушування проб СШ-1, одноструменевий спектрофотометр UNICO 2800; портативний газоаналізатор Testo 350; подрібнювач високооборотній PG1000; прес гідравлічний 2ПГ-10.

За допомогою інструментальних методів дослідження визначали такі показники:

- вологість БССК, ПР, ПБ;
- геометричні параметри БСС, ПР, ПБ;
- масу ПР, ПБ;
- міцність стебла, ПБ;
- щільність твердих паливних матеріалів (ПБ, ПР);
- аналіз хімічного складу залишків та продуктів згорання;
- спектри витяжок із зольних залишків продуктів згорання ПБ та ПР.

Обладнання для визначення вологості:

- 1) Вологість рулонів визначали вологоміром ТК-100 (рис. 3.1. а), ПБ вологоміром MD-5G (рис. 3.1. б) та стандартним методом висушування у сушильній шафі типу СШ-1. (ДСТУ EN 14774-1:2013)
- 2) Вологість БССК визначали за допомогою вологомірів ТК-100 та MD-5G.



Рисунок 3.1 – Вологоміри: а – ТК-100; б – MD-4G

Обладнання для визначення зусилля різання БССК та ПБ. Визначення зусилля різання стебел сільськогосподарських культур визначали за допомогою розробленого на кафедрі аграрної інженерії імені професора Г. А. Хайліса лабораторного стенда, що містить ніж 1, фіксатор 2, динамометр електронний 3, захват 4, раму 5 (рис 3.2).

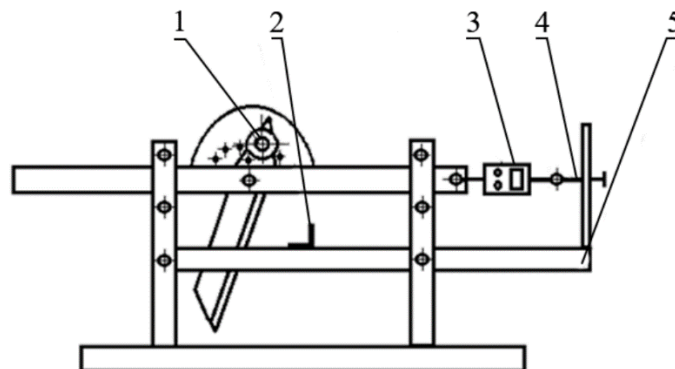


Рисунок 3.2 – Лабораторний стенд для визначення зусилля різання стебел: 1 – ніж; 2 – фіксатор; 3 – динамометр електронний; 4 – захват; 5 – рама

Обладнання для дослідження пружних властивостей (відновлення) стебел сільськогосподарських культур. Використовувався лабораторний стенд для визначення пружних властивостей (рис. 3.3) стебел сільськогосподарських рослин.

Він містить опорний бруса 1, що жорстко закріплений на столі 2, за допомогою затискачів 3.

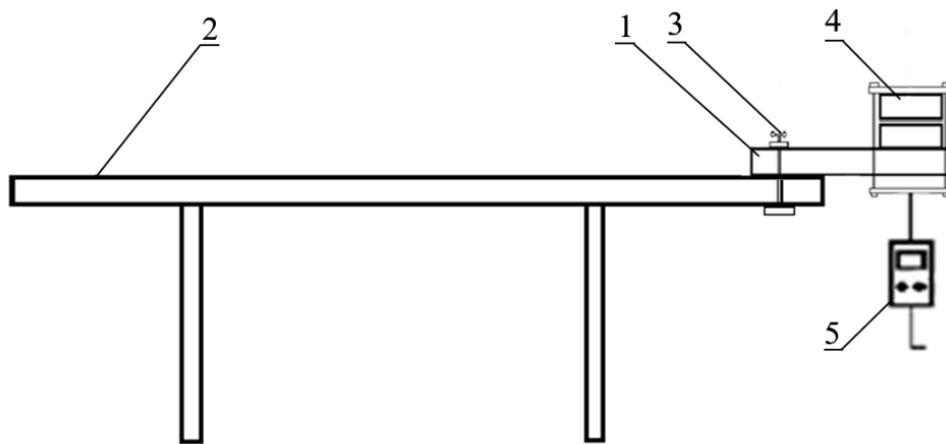


Рисунок 3.3 – Лабораторний стенд для визначення пружних властивостей: 1 – опорний брус; 2 – стіл; 3 – затискачі; 4 – стисне пристосування; 5 – динамометр електронний

На опорний брус встановлюється стисне пристосування (рис. 3.4) 4, до якого приєднується динамометр електронний.

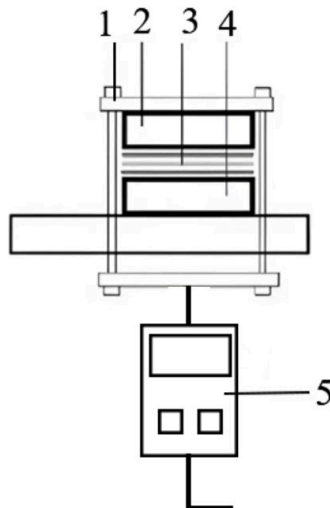


Рисунок 3.4 – Стисне пристосування: 1 – рамка; 2,4 – верхня та нижня колодки; 3 – стебла сільськогосподарських культур; 5 – динамометр електронний

Стисне пристосування містить раму 1, верхню та нижню колодки 2, 4 між якими розміщують досліджувані зразки стебел та динамометр електронний 5, до якого застосовується необхідна сила.

Дослідження шкідливості димових газів. Для дослідження димових газів використовувалася спеціально виготовлена портативна пічка (рис. 3.5 а), твердопаливний котел KALVIS, для аналізу продуктів згорання ПР та ПБ використовувався портативний газоаналізатор Testo 340 (рис. 3.5 б).

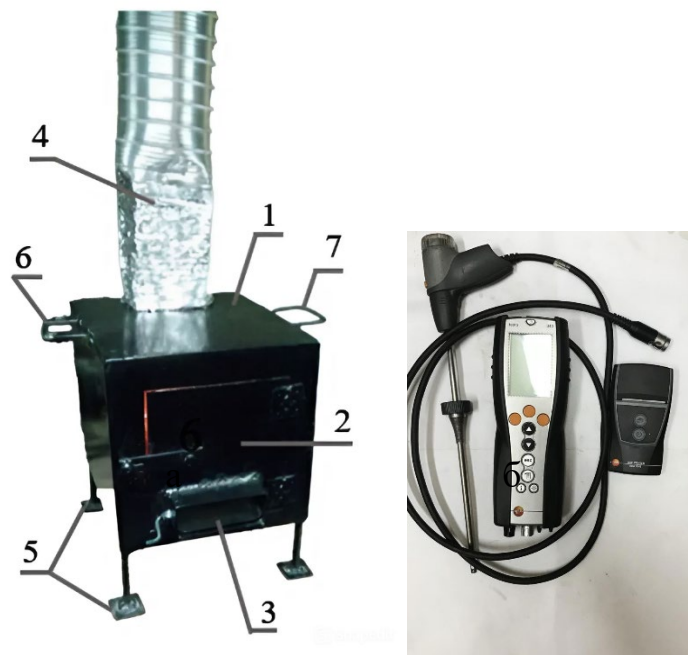


Рисунок 3.5 – Обладнання для дослідження шкідливості димових газів:

а - портативна пічка: 1 - корпус; 2 - дверцята; 3 - піддувало; 4 - димохід; 5 - ніжки; 6 - ручки; б - портативний газоаналізатор Testo 340 [93]

Портативна пічка (рис. 3.5, а) виготовлена з металу товщина якого 3 мм та являє собою металевий зварений прямокутник розміри якого: висота 30 см, ширина 30 см, довжина 32 см. Дверцята мають розміри: висота 22 см, ширина 20 см. Для завантаження паливних матеріалів встановлене регульоване піддувало, що дозволяє регулювати кількість подачі повітря до камери згорання. Пічка також має димохід, розмір якого 10 на 11 см, через який робляться заміри викидів.

Газоаналізатор Testo 340 (рис. 3.5, б) – це ручний вимірювальний прилад, що використовується для професійного аналізу димових газів [93].

КПЗО для виготовлення ПР з БССК. Для проведення досліджень було розроблено експериментальне обладнання – КПЗО. За його допомогою проведено дослідження процесу формування ПР із БССК та визначено оптимальні технологічні параметри для досягнення необхідної щільності. Схема КПЗО для дослідження впливу сили стиснення на щільність одержаних ПР представлена на рис. 3.6, а загальний вигляд – на рис. 3.7, б.

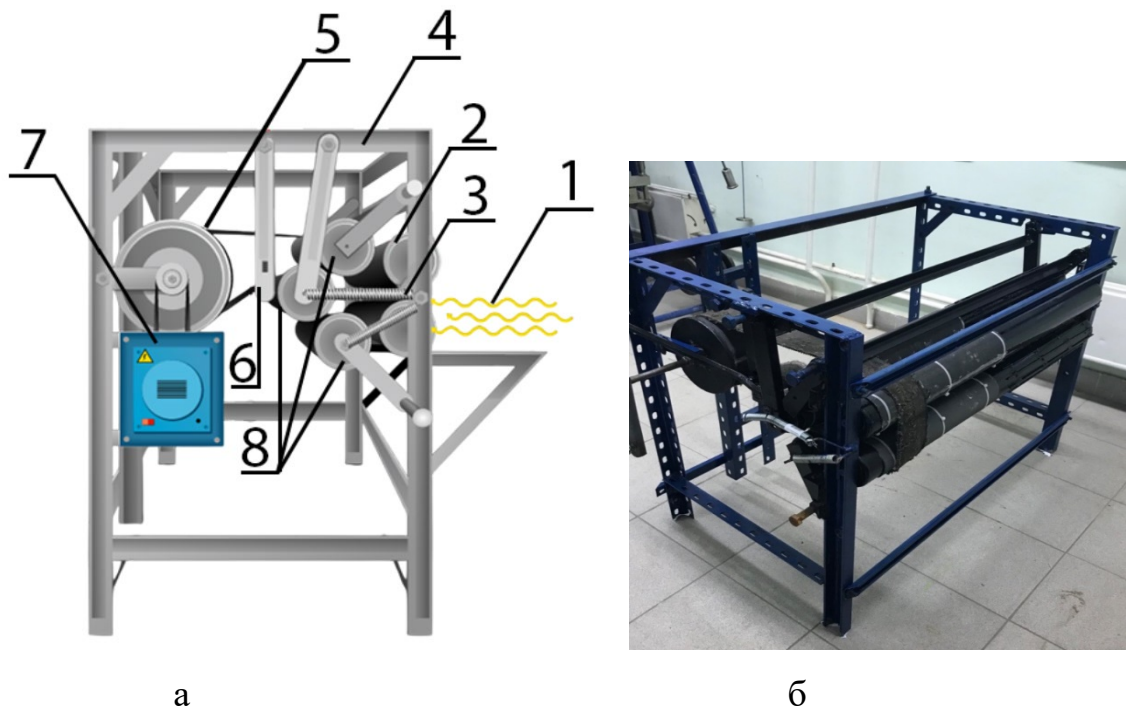


Рисунок 3.6 – КПЗО для формування ПР із БССК: а – схема, б – загальний вигляд:

1 - БССК; 2 - притискні ролики; 3 - пружини ; 4 - рама; 5 – привідний пас; 6 - натяжний ролик; 7 - двигун; 8 - ущільнювальні ролики

БССК 1 надходить у КПЗО між пресуючими роликами 2, що стискають матеріал у більш щільну форму. Пружини 3 забезпечують рівномірний тиск роликів, у той час як приводний пас 5, що приводиться в дію двигуном 7, обертає ролики. З кожним обертом ущільнювальних роликів 8 посилюється дія пружини 3. Це дозволяє отримати рулон необхідної щільності. Натяжний ролик 6 забезпечує

натягнення приводного пасу, мінімізуючи ковзання та підвищуючи ефективність формування ПР.

Щільність утворених ПР забезпечується силою, що діє на БССК. Дві пружини розташовані для контролю сили ущільнення (рис. 3.6). Вісь нижнього ролика встановлена на рамі, що забезпечує стійкість і стабільність під час роботи.

Обладнання для пресування паливних брикетів. Для дослідження процесу пресування використовувався прес гідравлічний 2ПГ-10 (рис. 3.7 а) та прес-форми (рис. 3.7 б), що складаються із верхнього 1 та нижнього 2 пуансона матриці 3, подовженого пуансона 4.



а

б

Рисунок 3.7 – Обладнання для пресування ПБ; а - прес гідравлічний 2ПГ-10; б - дослідна прес-форма для пресування ПБ: 1, 2 - верхній та нижній пуансони матриці; 3 - подовжений пуансон; 4 - матриця

Прес гідравлічний 2ПГ-10 оснащений торсіонним вимірювачем сили. Відображення навантаження, що створюється на зразок, виводиться на аналоговий циферблат. Виконуючи досліди з пресування ПБ з БССК притримувались такої послідовності: встановлювали завантажену прес-форму між пластини пресу, після чого запускали електродвигун, поворотом ручки за часовою стрілкою виставляли

необхідний тиск та витримували 2-3 с, після чого звільняли прес-форму від ПБ та повторювали операцію.

З врахуванням особливостей стебел льону як об'єкта пресування (наявність залишків волокна, висока чутливість до перегрівання, нерівномірність часток подрібненого матеріалу і, як наслідок, ускладнене переміщення обертовими робочими елементами транспортуючих пристроїв), а також зважаючи на недоліки існуючих типів пресувальних засобів, що застосовуються для виготовлення ПБ, пелет, приходимо до висновку, що для формування подрібнених часток стебел льону доцільним буде застосування в'язучого складника, а саме стебел колосових зернових культур.

3.2 Методика визначення вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур, паливних рулонів та паливних брикетів

Визначення вологості БССК. Перед обробленням БССК після збирання зернозбиральним комбайном необхідно визначити вологість. При вимірах необхідно враховувати наявність роси, яка рівномірно розподіляється на верхньому шарі БССК та через невеликий проміжок часу під сонцем та вітром випаровується. Волога ж із БССК залишається всередині та може зіпсувати сировину після її збирання, оскільки надлишок вологи спричиняє розвиток плісняви та грибків, подальшого гниття та погіршення якості сировини, тоді як в гіршому випадку висока мікробіологічна активність може спричинити самозаймання тюків. Щоб пришвидшити просушування валків їх можна механізовано зворушувати та перевертати.

Показники вологості БССК вимірювали двома методами: прямий метод передбачає поділ сировини на суху і вологу, зважування після висушування і підрахунок. Вологість визначають як середнє арифметичне з результатів двох проб.

Для вимірювання вологості БССК в полі було використано вологомір ТК-100 (рис. 3.8). Вимірювання проводили у сформованих валках після збирання зерна зернозбиральним комбайном. Вимірювання проводили у п'ятиразовій повторюваності.

Для контролю отриманих результатів проводили визначення вологості методом висушування. Під час визначення вологості за допомогою сушильної шафи типу СШ–1 наважки масою по 50 г поміщають в попередньо зважену тару, а потім в сушильну шафу і висушують за температури 100–105 °С до постійної маси. Перше зважування проводили через 2 години після початку висушування, наступне через кожні 15–20 хв до тих пір, поки маса буде відрізнятися від попередньої менше ніж на 0,1 г. В сушильну шафу можна поміщати декілька наважок. Кожну наважку забезпечували паперовою етикеткою з зазначенням номера аналізу і часу початку сушіння. Вологість БССК (W) у відсотках розраховуємо за формулою

$$W = \frac{(m - m_1) \cdot 100}{m} \% \quad (3.1)$$

де: m – маса наважки до висушування, г;

m_1 – маса наважки після висушування, г.

Вимірювання та контроль отриманих результатів проводили у п'ятиразовій повторюваності.

Визначення вологості ПБ. Вологість щільно спресованих ПБ визначали за допомогою вологоміра MD-4G.



Рисунок 3.8 – Процес вимірювання вологості вологоміром ТК-100: 1 – БССК;
2 – ПР.

Визначення вологості ПР. Одним із основних показників, що впливають на формування, зберігання та використання ПР є їх вологість, яка показує відношення маси води, що знаходиться в матеріалі, до загальної маси досліджуваного зразка, виражена у відсотках.

Визначення вологості для ПР проводили в лабораторних умовах Луцького національного технічного університету. Для дослідження вологості ПР застосовувався вологомір ТК-100.

Вимірювання вологості здійснювалися за висотою рулону та у напрямку від серцевини рулону до периферії (рис.3.9). При вимірюванні вологості по висоті ПР щуп вологоміра вводився з бічної поверхні, виміри проводились в п'яти точках (рис. 3.9 а). Під час вимірювання вологості ПР від серцевини до периферії щуп вологоміра вводився із сторони вершини в торець рулону (рис. 3.9 б).

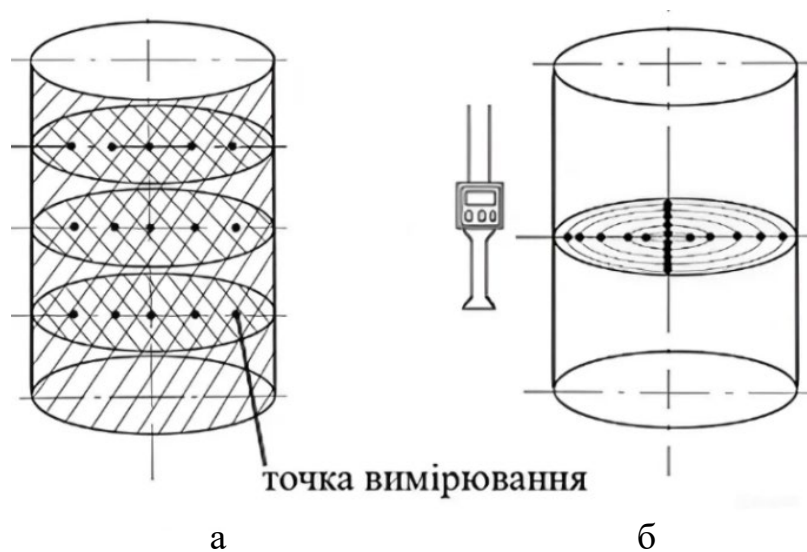


Рисунок 3.9 – Вимірювання вологості ПР; а – за висотою ПР; б – в напрямку від серцевини до периферії

Додатково розглядали зміну вологості ПР під час зберігання за різної температури та вологості у приміщенні, а саме: у сухому середовищі (вологість 40–60%, температура 20–24 °С); у вологому середовищі (вологість 60–80%, температура 16–20 °С) протягом одного тижня.

3.3 Методика дослідження впливу пружних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур на процес їх відновлення

Біомаса стебел сільськогосподарських культур має яскраво вираженні пружні властивості, які впливають на процес скручування та ущільнення. Тому є потреба дослідити як швидко відновлюються стебла сільськогосподарських культур після зняття навантаження від дії робочих органів засобів оброблення.

Мета дослідження – визначити, як впливає перебування стебел в розплющеному стані на їх процес відновлення. Досліди проводились у лабораторних умовах за допомогою пристосування для визначення пружних властивостей стебел сільськогосподарських культур (рис. 3.4).

У кожній групі стебел заміряли висоту стебел перед початком досліду та фарбою робили мітку. Зразки стебел сільськогосподарських культур поміщали між пресувальні колодки. Миттєво навантажували пристосування на стебло так, щоб утворювався тиск рівний 250 кПа. Враховуючи, що 250 кПа дорівнюють 2,54 кг сили на квадратний сантиметр обчислювали площу контакту стебел соломи з колодками. Для прикладу для досліду було використано 5 стебел льону олійного, площа контакту рівна 12,5 см², отже потрібно прикласти 31,25 кг сили. Тривалість навантаження тривала 1 хв. Після зняття навантаження відразу заміряли товщину стебла в позначеному місці й занотовували дані, далі заміряли товщину стебла за 60 секунд після зняття навантаження. Час дії навантаження контролювали за допомогою секундоміра. Дослідження повторювали в триразовій повторюваності.

3.4 Методика визначення зусилля подрібнення стебел сільськогосподарських рослин

Метою дослідження є визначення раціональних умов руйнування стебел озимої пшениці, льону олійного та льону-довгунця шляхом експериментального встановлення зусиль різання для окремих і згрупованих стебел із використанням лабораторного стенда, з урахуванням анатомічної будови рослин

Для спрощення визначення раціональних умов руйнування стебел озимої пшениці, льону олійного та льону-довгунця була прийнята схема (рис. 3.10). Дослідження зусилля подрібнення проводили за допомогою лабораторного стенда для визначення зусилля різання (рис. 3.3).

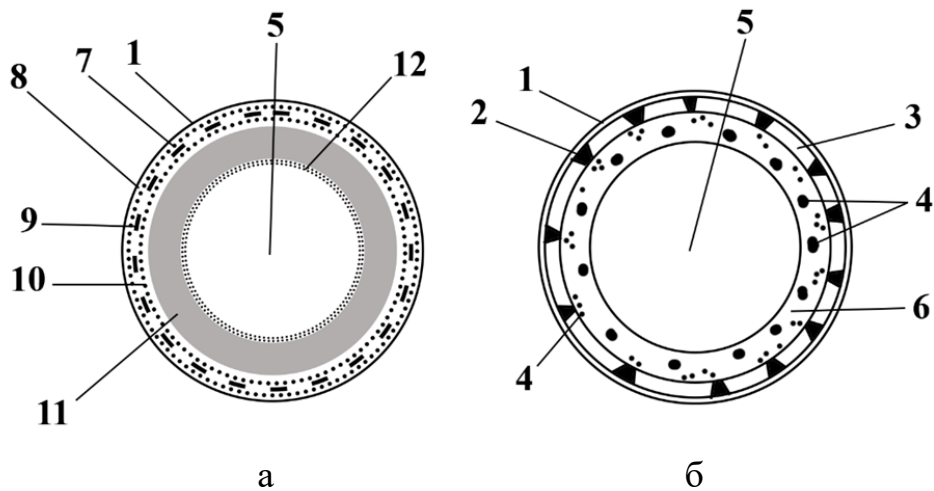


Рисунок 3.10 – Схема стебел сільськогосподарських культур в розрізі:
 а- стебло льону; б - стебло пшениці; 1 – епідерміс; 2 – склеренхіма; 3 – хлоренхіма; 4 – провідні колатеральні судинно-волокнисті пучки; 5 – порожнина стебла; 6 – флоема; 7 – кутикула; 8 – корова паренхіма; 9 – луб'яні пучки; 10 – камбій; 11 – деревина; 12 – серцевина

Для проведення дослідження підготовлено зразки у двох варіантах: окремі стебла та пучки із п'яти стебел. Зразки формували з урахуванням рівномірної довжини та типової морфологічної структури відповідних культур: озимої пшениці, льону олійного та льону-довгунця. Перед випробуванням стебла попередньо кондиціонували до відповідної вологості, яка фіксувалась для кожної серії експерименту.

Зразки фіксували у тримачі лабораторного стенда для визначення зусилля різання (рис. 3.3), таким чином, щоб зона зрізу відповідала обраній ділянці стебла (нижня, середня або верхня частина). Над стеблами встановлювався ніж, закріплений на рухомому механізмі, з'єднаному з електронним динамометром. За допомогою контрольованого захвату здійснювалося поступове переміщення ножа вертикально вниз на постійній швидкості до моменту повного перерізування зразка.

У момент максимального опору з боку стебла електронний динамометр фіксував значення зусилля, необхідного для перерізаня. Для кожного типу зразка та кожної ділянки проводили три повтори, результати яких записували та аналізували. Середнє значення зусиль та відхилення обчислювали математико-статистичними методами.

3.5 Методика визначення щільності компактних паливних рулонів виготовлених у камері змінного об'єму методом математичного планування експерименту

Мета експерименту полягає у визначенні щільності сформованих ПР в процесі формування БССК у КПЗО при варіюванні технологічних параметрів: тиску, що створюється роликками у КПЗО (P , МПа), об'єму погонного метра сировини, що подається в КПЗО (v , м³), відсоткового вмісту волокнисто-стеблової маси льону у загальній масі (m , %).

Планування експерименту передбачає кодування факторів складання складання таблиці рівнів варіювання факторів, складання матриці планування за планом Бокса-Бенкіна, проведення дослідів згідно з матрицею планування, визначення коефіцієнтів рівняння регресії, перевірку адекватності отриманої математичної моделі, розкодування факторів і представлення рівняння регресії в натуральному вигляді.

Для складання таблиці рівнів варіювання факторів (табл. 3.1) враховані дослідження [12, 94, 95, 96].

Таблиця 3.1 – Рівні варіювання факторів для визначення щільності компактних паливних рулонів

| Рівні варіювання | Тиск, P , (X1), МПа | Об'єм погонного метра БССК V , (X2), м ³ | Вміст стебел льону m , (X3), % |
|-----------------------------------|-----------------------|---|----------------------------------|
| Верхній (+1) | 0,60 | 0,8 | 75 |
| Основний (0) | 0,55 | 0,7 | 50 |
| Нижній (-1) | 0,50 | 0,6 | 25 |
| Інтервал варіювання ε | 0,05 | 0,1 | 25 |

У таблиці 3.2 подано матрицю планування трифакторного експерименту за планом Бокса-Бенкінга [94]. Фактори представлені в кодованому форматі. Порядок експериментів визначали за допомогою таблиці випадкових чисел.

Таблиця 3.2 – Матриця трьох факторного експерименту за планом Бокса-Бенкіна

| № З/П | Тиск, Р, МПа | Обсяг погонного метра БССК, V, м ³ | Вміст стебел льону, м, % |
|----------|-----------------|--|-----------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | -1 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | 0 |
| 4 | -1 | -1 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | -1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | -1 |
| 8 | -1 | 0 | -1 |
| 9 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | 0 | -1 | 1 |
| 11 | 0 | 1 | -1 |
| 12 | 0 | -1 | -1 |
| 13 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

Функція відгуку (Y), що представляє щільність ПР, виражається у факторному просторі як рівняння нелінійної регресії:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2, \quad (3.2)$$

де: X_1, X_2, X_3 – кодовані фактори для P, V і m .

Оброблення результатів трьохфакторного експерименту відбувалось за методикою [12, 94, 95, 96, 97]. За критерієм Стюдента (t-критерій) перевіряли в статистичну значущість коефіцієнтів отриманого рівняння регресії. Перевірку адекватності моделі проводили за F – критерієм Фішера. Однорідність дисперсій

результатів експерименту оцінювали за критерієм Кохрена.

Щільність паливних рулонів визначається як відношення маси сформованого рулону до його геометричного об'єму. Для цього спочатку здійснюється зважування рулону після його формування з метою встановлення його фактичної маси. Далі проводяться вимірювання основних геометричних параметрів рулону — зовнішнього діаметра та довжини (яка одночасно є шириною рулону). Оскільки паливний рулон за формою наближений до циліндра, його об'єм обчислюється за класичною формулою для об'єму циліндра:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l, \quad (3.3)$$

де: d – діаметр рулону,

l – його довжина.

Після визначення маси рулону та його об'єму щільність обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.4)$$

де: m – маса паливного рулону, кг;

V – об'єм паливного рулону, м³;

ρ – щільність паливного рулону, кг/м³.

Щільність є визначальним показником якості для ПР. Вона впливає на теплотворну здатність ПР, їх транспортування та зберігання.

3.6 Методика виготовлення паливних брикетів для дослідження продуктів їх згорання

Метою методики є виготовлення паливних брикетів із подрібненої біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК) різного складу в лабораторних умовах для подальшого дослідження продуктів їх згорання. Отримані брикети служать модельними зразками паливних рулонів, що виготовляються в реальних

виробничих умовах, і дозволяють оцінити якість та екологічні характеристики біопалива залежно від складу сировини.

Для виготовлення паливних брикетів як модельних зразків паливних рулонів використовувалася подрібнена біомаса стебел сільськогосподарських культур (БССК), що включала стебла льону, пшениці або їх суміші у заданих пропорціях (наприклад, Л75/П25, Л50/П50, Л25/П75). Підготовка сировини здійснювалася у кілька етапів:

Подрібнення сировини. БССК подрібнювали за допомогою високошвидкісного подрібнювача PG1000. Пристрій складається з металевої місткості з вмонтованими ріжучими ножами, електродвигуна, вимикача та таймера. Таймер дозволяє точно регулювати тривалість подрібнення, що забезпечує однорідність фракційної структури біомаси. Для кожного зразка час подрібнення підбирався експериментально, з урахуванням вологості та виду сировини, для досягнення однакових умов ущільнення.

Формування паливних брикетів. Подрібнена сировина завантажувалася у прес-форму, яка складається з циліндричної матриці, нижнього та верхнього пуансона, а також подовженого пуансона, який використовується на етапі вивантаження. Пресування здійснювали за допомогою гідравлічного пресу моделі 2ПГ-10 (рис. 3.7). Прес забезпечує стабільний тиск, необхідний для формування паливних брикетів без тріщин і розшарувань. Процес формування складається з трьох етапів (рис. 3.11):

а – під час процесу завантаження сировина щільно укладається у матрицю вручну або з використанням вібрації для зменшення внутрішніх пустот;

б – відбувається основне ущільнення за допомогою верхнього пуансона. Тиск пресування встановлювався у діапазоні, оптимальному для забезпечення аналогічної щільності, як у паливних рулонах;

в – після завершення ущільнення форма встановлюється на платформу, і за допомогою подовженого пуансона нижній пуансон проштовхує сформований брикет униз, забезпечуючи безпечне вивантаження без деформацій.

Сформовані паливні брикети використовувалися як лабораторні зразки для дослідження процесів згоряння, зольності, складу димових газів та інших

показників.

Отримані результати застосовувалися для аналізу якості паливних рулонів, виготовлених з ідентичної сировини

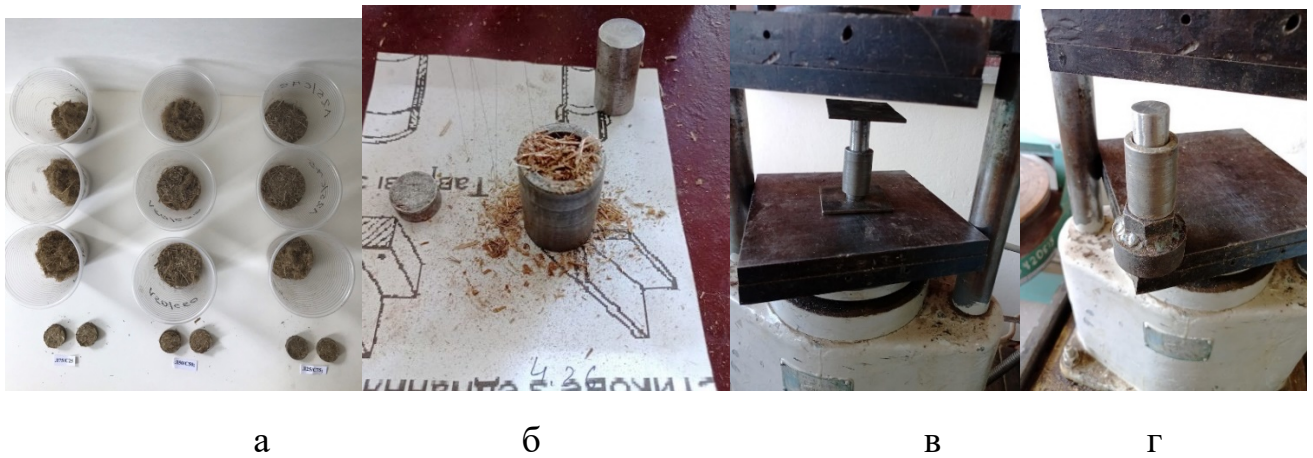


Рисунок 3.11 – Процес виготовлення ПБ: а – зразки сумішей; б – процес завантаження; в – процес пресування; г – процес вивантаження

Проведено дослідження процесу пресування ПБ із подрібненої БССК із використанням гідравлічного пресу 2ПГ-10 та прес-форми. Забезпечено ефективність формування ПБ, а також можливість їх якісного вивантаження без деформацій.

3.7 Методика дослідження продуктів згоряння паливних брикетів різного складу в лабораторних умовах

Метою методики є дослідження спектральних характеристик витяжок зольних залишків згоряння паливних брикетів (ПБ), виготовлених із різного складу біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК), для оцінки екологічної безпечності. Паливні брикети розглядаються як лабораторні моделі паливних рулонів (ПР) із ідентичної сировини. Це дозволяє за результатами лабораторних досліджень спрогнозувати поведінку рулонів під час згоряння.

Методика узгоджується з положеннями Національної стратегії управління відходами в Україні на період до 2030 року (розпорядження КМУ № 820-р від 08.11.2017 р.) [101], яка наголошує на необхідності енергетичної утилізації органічних залишків сільського господарства. Враховано також вимоги Закону

України «Про охорону атмосферного повітря» [102], що регламентує викиди при спалюванні біомаси, а також принципи системи екологічного менеджменту ISO 14001 [103] (ДСТУ ISO 14001:2015) [104], яка рекомендована для впровадження на підприємствах із переробки агровідходів.

Дослідження горіння зразків твердого біопалива – ПБ, виготовлених за методикою, описаною в підрозділі 3.6 проводили у спеціально виготовленій портативній пічці (рис. 3.12). Після згоряння отримали зольні залишки паливних брикетів різного складу. За зразок для порівняння прийняли витяжку зольного залишку деревини дуба.



Рисунок 3.12 – Процес горіння паливних брикетів

Для оцінки якості та екологічної безпечності твердих паливних матеріалів за допомогою спектрофотометра UNICO 2800 (рис. 3.13) було досліджено зольні залишки із продуктів спалювання виготовлених ПБ із соломи льону та соломи колосових зернових різному співвідношенні.

Прилад має 29-знакову клавіатуру та вбудований процесор, що дозволяє проводити всі аналітичні вимірювання без підключення до персонального комп'ютера. Режими вимірювань, градування й отримані спектри зберігаються в незалежній пам'яті. Дослідження проводять з використанням кювет завдовжки до 100 мм. Конструкція спектрофотометра UNICO 2800 заснована на використанні оптичних елементів із захисним покриттям. Джерелами випромінювання є дейтерієва і галогенова лампи [98].



Рисунок 3.13 – Спектрофотометр UNICO 2800

Процес дослідження включав:

- Спалювання зразків. Паливні брикети спалювали у портативній пічці. Після повного згоряння зібрані зольні залишки від кожного зразка.

- Підготовка витяжок. Із кожного зольного зразка готувалась водна витяжка для спектрофотометричного аналізу.

- Підготовка спектрофотометра UNICO 2800. Кювету №2 наповнювали дистильованою водою (холостий розчин). Кювети №1, 3, 4, 5 – витяжками з відповідних зразків. Кювети встановлювали у відповідні гнізда приладу.

- Калібрування. Після запуску приладу встановлювали параметри сканування: початкову та кінцеву довжину хвилі, крок і швидкість сканування. У режимі пропускання (%T) встановлювали базову лінію, скануючи дистильовану воду

Дослідження проводили таким чином. Кювету № 2 заповнювали нульовим розчином (дистильованою водою). Кювети № 1, № 3, № 4, № 5 заповнювали витяжками з відповідних зразків. Кювети встановлювали у пронумеровані позиції спектрофотометра UNICO 2800. Закривали кришку приладу.

Наступним кроком заходили у режим сканування. Вводили початкове і кінцеве значення довжини хвилі з цифрової клавіатури. Вибирали крок і швидкість сканування, користуючись клавішами [Λ] або [V]. Підтверджували введені установки, вибирали режим сканування пропускання T%. Після установки параметрів сканування (як описано вище), встановлювали кювету з холостим розчином на шляху променя. Натискали [0Abs /% T] для сканування базової лінії.

Довжина хвилі в верхньому лівому кутку пробігає значення від максимально встановленого до мінімального.

Встановлювали по чергово кювети з пробами на шляху променя. Після натискання [START], виконувалось сканування. На екрані відображався спектр проби щодо базової лінії (холостого розчину). Далі обробляли отримані спектри, шукаючи піки. Отримані спектри відображалися на дисплеї приладу у вигляді кривих поглинання/пропускання. Аналіз спектрів. У кожному спектрі ідентифікували положення і висоту піків. Отримані спектри витяжок зольних залишків паливних брикетів порівнювали зі зразком.

3.8 Методика дослідження показників якості та екологічності компактних паливних рулонів у виробничих умовах

Метою методики є експериментальне визначення показників якості та екологічності згоряння ПР, виготовлених із біомаси стебел сільськогосподарських культур різного співвідношення, у реальних умовах експлуатації котельного обладнання. Це дослідження спрямоване на оцінку потенціалу паливних рулонів як ефективного та екологічно безпечного виду твердого біопалива.

Дослідження проводили у лабораторних та виробничих умовах. У лабораторних умовах використовували портативну пічку (рис. 3.1).



Рисунок 3.14 – Процес горіння ПР у лабораторних умовах

Дослідження проводили у виробничих умовах котельні Луцького національного технічного університету, де для спалювання компактних паливних рулонів використовувався твердопаливний котел КАЛВІС-400. Під час випробувань здійснювалося спалювання паливних рулонів, виготовлених у дослідній партії з БССК різного складу. Основна увага приділялась аналізу хімічного складу димових газів, інтенсивності утворення викидів та ефективності згоряння палива. Для дослідження газового середовища та фіксації параметрів процесу згоряння використовувався портативний газоаналізатор Testo 340 (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Проведення випробування визначення якісного та кількісного складу викидів від спалювання ПР

Газоаналізатор Testo 340 складається з блоку управління, аналізатора та набору змінних зондів, що дозволяє здійснювати оперативне вимірювання широкого спектру показників, включаючи концентрації оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x), а також визначати температуру та кисневий баланс у каналі димовідведення. Дані фіксувались під час безперервного процесу горіння, що дозволило оцінити динаміку згоряння та стабільність процесу. Крім того, проводився розрахунок ефективності роботи котла на основі аналізу показників втрат тепла з відхідними газами.

З метою оцінки комплексної енергетичної ефективності та екологічної доцільності використання ПР як палива в реальних умовах було проведено




зіставлення отриманих результатів з даними спалювання твердого палива, а саме дубових дров. Для забезпечення достовірності результати досліджень були зіставлені з вимогами нормативної документації.

Під час випробування визначено якісний та кількісний склад викидів від спалювання ПР, проведено розрахунок ефективності використання котельні (котел КАЛВІС-400). Довідка про результати дослідження наведена в додатку Ж. Дослідження проводилось за нормативною методикою та у відповідності до інструкції по монтажу й обслуговуванню опалювального водонагрівального котла KALVIS – 400. Таким чином, методика дозволяє об'єктивно оцінити якість процесу згоряння паливних рулонів, встановити рівень шкідливих викидів, а також дати обґрунтовану оцінку їх доцільності для промислового впровадження.

3.9 Методика комплексного оцінювання якості компактних паливних рулонів

У дослідженнях розглядали три різні варіанти ПР, кожен з яких мав різний пропорційний склад сировини. У таблиці 3.3. наведені варіанти ПР, використані в експериментах.

Таблиця 3.3 - Варіанти ПР

| Варіант | Пропорційний склад компонентів , % | | Тип ПР | Зображення ПР |
|---------|------------------------------------|---------------|----------|---|
| | Стебла льону | Пшениця, жито | | |
| 1 | 75 | 25 | 1Л75/П25 |  |
| 2 | 50 | 50 | 2Л50/П50 |  |
| 3 | 25 | 75 | 3Л25/П75 |  |

Паливні рулони спалювали в портативній пічці, обладнаній ручним завантаженням палива (рис. 3.12, а). Під час дослідів контролювали якісний та кількісний склад викидів димових газів для кожного варіанта ПР. Для цього використовувався портативний газоаналізатор Testo 340.

Основні фізичні властивості вимірювали за допомогою стандартних методів: вміст вологи визначали за допомогою сушіння в печі (ISO 18134-1:2022; ISO 18134-2:2024), а вміст золи – за допомогою спалювання в муфельній печі (EN-ISO 18122:2022).

Оцінювання загальної якості паливних матеріалів здійснювався шляхом розрахунку комплексного показника (КПЯ), що враховує вплив ряду технічних і екологічних параметрів. Для інтегрування численних факторів у єдиний кількісний індекс застосовано метод багатокритеріальної нормалізації з подальшим зважуванням за експертною оцінкою:

$$\text{КПЯ} = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i, \quad (3.12)$$

де W_i - вага i -го параметра, що відображає ступінь його впливу на загальну якість твердого палива;

P_i - нормалізована безрозмірна оцінка параметра в межах діапазону (0-1).

Вагомість параметрів визначено експертним методом. До участі були залучені фахівці у сфері біоенергетики, теплотехніки, агропереробки та екології. Їм було надано перелік параметрів із поясненням їхнього значення та впливу на експлуатаційні властивості палива. Як еталон використовувались характеристики високоякісного біопалива — зокрема, дубові дрова.

Експерти оцінювали значущість кожного параметра за заздалегідь визначеною шкалою (від 1 до 10). Зібрані оцінки оброблялись для визначення середнього рейтингу або медіани для кожного параметра. Індивідуальна оцінка S_{ij} для параметра i , наданий експертом j , були усереднені (S_i):

$$S_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}$$

де: S_{ij} - оцінка, присвоєна експертом j ;

m - кількість експертів.

Потім отримані бали нормалізували таким чином, щоб сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнювала 1. Вага кожного параметра W_i розраховувалася як:

$$W_i = \frac{S_i}{\sum S_i}. \quad (3.14)$$

Ступінь збігу думок експертів аналізувався за допомогою статистичних методів.

Нормована оцінка P_i відображає ступінь відповідності фактичного значення ідеальному (еталонному) і масштабується у безрозмірний інтервал $[0; 1]$. Формула нормалізації залежить від співвідношення між значенням параметра та якістю палива:

1) Пряма кореляція (чим вище значення, тим краща якість):

$$P_i = \frac{\text{виміряне значення}}{\text{еталонне значення}}, \quad (3.15)$$

де: *виміряне значення* - фактичне значення отримане в результаті експериментів;

еталонне значення - стандартне або контрольне значення для оптимальної якості палива.

Значення $P_i > 1$ свідчить про перевищення еталонного рівня, а $P_i < 1$ – про відставання.

3) Зворотна кореляція (чим менше значення, тим краща якість):

$$P_i = \frac{\text{еталонне значення}}{\text{виміряне значення}}. \quad (3.16)$$

Дослідження проводили в котельні Луцького національного технічного університету (ЛНТУ) з використанням ПР, виготовлених із БССК стебел льону та пшениці вирощеної на дослідних ділянках. Це забезпечувало безпосередній контроль як за умовами вирощування, так і за подальшим обробленням БССК у ПР, дозволяючи більш точно оцінювати характеристики їх згорання в контрольованих умовах.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі запропоновані методики проведення експериментальних досліджень. Вони дозволяють:

- визначити вологість БССК, ПР, ПБ;
- дослідити вплив пружних властивостей БССК на час відновлення стебел;
- визначити зусилля подрібнення БССК;
- визначити щільність компактних ПР з різним співвідношенням складових частин, виготовлених у пресувальній камері, методом математичного планування експерименту;
- запропонувати методику виготовлення ПБ для дослідження продуктів їх згорання;
- дослідити продукти згорання ПБ;
- дослідити показники якості ПР та ПБ у лабораторних та виробничих умовах;
- провести комплексну оцінку якості ПР.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Характеристика досліджуваних зразків біомаси стебел сільськогосподарських культур, компактних паливних ролонів, паливних брикетів

Для визначення властивостей та показників БССК використовували: озиму пшеницю, льон олійний, льон-довгунець які були вирощені на ділянках: дослідна ділянка ЛНТУ, дослідна ділянка Володимир-Волинського ЦПО, дослідна ділянка фермерського господарства АГРОТРЕЙД-ПСС.

В табл. 4.1 подана характеристика зразків сільськогосподарських культур, що використовувалася для досліджень.

Таблиця 4.1 - Характеристики досліджуваних зразків сільськогосподарських культур

| | Озима пшениця | Льон олійний | Льон-довгунець |
|---------------------------|---------------|--------------|----------------|
| Вегетаційний період, днів | 190-210 | 85-115 | 75-90 |
| Технічна довжина, см | 70-120 | 50-120 | 70-120 |
| Діаметр стебла, мм | 2,0-3,0 | 1,0-3,0 | 1,5-3,0 |
| Урожайність | | | |
| Зерна т/га | 4,5 | 1,0 | 0,6 |
| Соломи т/га | 4,5 | 1,0 | 4,0 |

Дані подані за результатами досліджень протягом 2021-2024 рр. варіанти для проведення дослідів із БССК, а саме льону олійного (рис. 4.1, а, льону-довгунця (рис. 4.1, б), пшениці озимої (рис. 4.1, в). проводились на полях господарств із урожаю 2021-2024 рр.








Рисунок 4.1 – Зразки сільськогосподарських культур: а – льон-довгунець; б – льон олійний; в – пшениця

Для подальших досліджень використані:

- стебла льону олійного, які зібрані на дослідній ділянці фермерського господарства АГРОТРЕЙД-ПСС після збирання насіння прямим способом зернозбиральним комбайном;
- стебла льону олійного, які зібрані на дослідній ділянці Володимир-Волинського ЦПО після скошування у фазі жовтої стиглості та вилежування у полі;
- стебла льону-довгунця, які зібрані на дослідній ділянці ЛНТУ;
- стебла пшениці, які були зібрані на дослідній ділянці Володимир-Волинського ЦПО після збирання насіння прямим способом зернозбиральним комбайном;
- подрібнені залишки стебел пшениці отриманні шляхом подрібнення стебел пшениці подрібнювачем високооборотним PG1000;
- подрібнені залишки стебел льону олійного отриманні шляхом подрібнення стебел пшениці подрібнювачем високооборотним PG1000.

У процесі досліджень отримані зразки стебел пшениці та льону. Характеристика стебел льону та пшениці для виготовлення ПР та подрібнення БССК для виготовлення ПБ наведена у таблиці 4.2.







Таблиця 4.2 - Зразки сировини для виготовлення паливних матеріалів

| № з/П | Зовнішній вигляд | Опис | Використання |
|-------|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 |  | Стебла льону олійного | Сировина для виготовлення ПР; сировина для виготовлення ПБ (необхідне подрібнення) |
| 2 |  | Стебла льону-довгунця | Сировина для виготовлення ПР; сировина для виготовлення ПБ (необхідне подрібнення) |
| 3 |  | Стебла пшениці | Сировина для виготовлення ПР; сировина для виготовлення ПБ (необхідне подрібнення) |
| 4 |  | Подрібнені залишки стебел пшениці | Сировина для виготовлення ПБ |
| 5 |  | Подрібнені залишки стебел льону олійного | Сировина для виготовлення ПБ |

У таблиці 4.2. подані зразки сировини для виготовлення паливних матеріалів. Для виготовлення ПР як сировина підходять стебла льону олійного, льону-довгунця та стебел пшениці. Для отримання ПБ стебла потрібно подрібнювати, щоб отримати сировину для їх виготовлення.

У таблиці 4.3. подано зразки готового твердого палива, що було отримане в процесі досліджень.

Таблиця 4.3 – Зразки готового твердого палива

| № з/П | Назва | Опис ПР, співвідношення складових частин стебел льону та пшениці, % | Зовнішній вигляд |
|-----------------------------|----------|---|---|
| Паливні рулони (ПР) | | | |
| 1 | Л75/П25 | Паливний рулон (ПР), який виготовлений шляхом скручування стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 30см, довжина 50 см. Вміст стебел льону 75%, стебел пшениці 25% |  |
| 2 | Л50/П50% | Паливний рулон (ПР), який виготовлений шляхом скручування стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 30см, довжина 50 см. Вміст стебел льону 50%, стебел пшениці 50% |  |
| 3 | Л25/П75 | Паливний рулон (ПР), який виготовлений шляхом скручування стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 30см, довжина 50 см. Вміст стебел льону 25%, стебел пшениці 75% |  |
| Паливні брикети (ПБ) | | | |
| 4 | Л25/П75 | Паливний брикет (ПБ), який виготовлений шляхом спресування подрібнених стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 21 мм, довжина 6 мм. Вміст стебел льону 75%, стебел пшениці 25% |  |
| 5 | Л50/П50 | Паливний брикет (ПБ), який виготовлений шляхом спресування подрібнених стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 21 мм, довжина 6 мм. Вміст стебел льону 50%, стебел пшениці 50% |  |
| 6 | Л75/П25 | Паливний брикет (ПБ), який виготовлений шляхом спресування подрібнених стебел льону та пшениці. Розмір: діаметр 21 мм, довжина 6 мм. Вміст стебел льону 25%, стебел пшениці 75% |  |

В таблиці 4.3 подані характеристики досліджуваних зразків твердого палива, а саме ПР та ПБ з різним співвідношення складових частин БССК. Розміри ПР - діаметр 30см, довжина 50 см. Розміри ПБ - діаметр 21 мм, довжина 6 мм.

Маса ПР залежить від щільності та геометричних параметрах ПР, а саме його висоти та радіусу. Маса ПР подана у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Маса ПР залежно від геометричних параметрів та щільності, кг

| ΔR (радіус паливного рулону), см | Висота рулону $h = 50$ см | | | | Висота рулону $h = 45$ см | | | | Висота рулону $h = 40$ см | | | |
|--|---------------------------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|
| | Щільність, ρ | | | | Щільність, ρ | | | | Щільність, ρ | | | |
| | 100 | 110 | 120 | 130 | 100 | 110 | 120 | 130 | 100 | 110 | 120 | 130 |
| 15 | 3,5 | 3,9 | 4,2 | 4,6 | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4,1 | 2,8 | 3,1 | 3,4 | 3,7 |
| 20 | 6,3 | 6,9 | 7,5 | 8,2 | 5,6 | 6,2 | 6,8 | 7,4 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
| 25 | 9,8 | 10,8 | 11,8 | 12,8 | 8,8 | 9,7 | 10,6 | 11,5 | 7,9 | 8,6 | 9,4 | 10,2 |
| 30 | 14,1 | 15,6 | 17,0 | 18,8 | 12,7 | 14,0 | 15,3 | 16,5 | 11,3 | 12,4 | 13,6 | 14,7 |

У таблиці 4.4. наведено масу рулонів, розраховану для різних значень щільності ($\rho = 100 - 130$ кг/м³), висоти ($h = 40, 45, 50$ см) та радіуса рулону ($\Delta R = 15, 20, 25, 30$ см).

4.2 Результати досліджень вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур та компактних паливних рулонів

4.1.1 Результати визначення вологості біомаси стебел сільськогосподарських культур.

Вологість БССК після збирання врожаю визначали методом описаним в підрозділі 3.2, відразу після збирання із зберіганням в полі з інтервалом в 5 днів, за середньодобової температури – 20-24°C та без опадів (табл. 4.5). Результати дослідження оброблялись математико-статистичними методами, похибка досліду в середньому склала 2,1% - 3,9%.

Таблиця 4.5 – Вологість БССК

| Вологість БССК після збирання врожаю, % | | |
|--|------------|-----------|
| Культура | Значення % | Похибка % |
| Пшениця озима | 21,7 | 3,9 |
| Льон-довгунець | 28,5 | 3,2 |
| Льон олійний | 27,3 | 3,5 |
| Вологість БССК після вилежування в полі, % | | |
| Культура | Значення % | Похибка % |
| Пшениця озима | 12,9 | 2,1 |
| Льон-довгунець | 20,8 | 2,7 |
| Льон олійний | 14,6 | 2,4 |

Вологість БССК суттєво знижується після вилежування на полі, що сприяє зменшенню витрат на сушіння та підвищує ефективність використання сировини у виробництві паливних матеріалів. Вологість для дотримання точності та відтворюваності дослідів вологість БССК визначали контрольним методом висушування.

Вологість для пшениці озимої була 20,3%, льону-довгунця – 26,7%, льону олійного 24,8%. Похибка досліду склала 1%. Аналогічно визначення вологості проводили методом висушування для БССК після вилежування в полі. Вологість для пшениці озимої була 11,2%, льону-довгунця – 18,7%, льону олійного 13,2%. Похибка досліду склала 1%. Зменшення вологості пояснюється транспортуванням БССК до лабораторії.

Важливо враховувати вихідну вологість сировини, адже вона впливає на енерговитрати та якість кінцевих продуктів (ПБ, ПР).

Вологість ПР та ПБ визначалась за методикою описаною в підпункті 3.2. Було виміряно вологість для 30 ПР та 30 ПБ з БССК з різним відсотковим співвідношенням вмісту стебел соломи льону та стебел соломи пшениці (табл. 4.3). Результати визначення вологості подані у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Вологість ПР, ПБ

| Склад, % | Вологість, % | |
|----------|--------------|---------|
| | ПР | ПБ |
| Л75/П25 | 9,1-11,0 | 8,9-9,1 |
| Л50/П50 | 8,7-10,0 | 8,2-9,4 |
| Л25/П75 | 8,3-9,0 | 7,4-8,7 |

Результати подані в таблиці 4.6 свідчать про рівномірне розподілення вологості в рулоні. Додавання соломи пшениці до складу рулонів знижує загальну вологість. Використання змішаних рулонів (з домішками соломи пшениці) є більш ефективним для зниження вологості БССК, що може зменшити витрати на сушіння та покращити енергетичні характеристики твердого біопалива.

На основі проведених досліджень встановлено, що вилежування біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК) у польових умовах протягом кількох днів сприяє суттєвому зниженню її вологості. Так, після 5-денного періоду зберігання на полі за середньодобової температури 20–24 °С та відсутності опадів, вологість озимої пшениці знижується в середньому 8,8 %, льону-довгунця – 7,7%, а льону олійного – 12,7%. Для паливних рулонів виготовлених із БССК у різному співвідношенні льону та соломи, вологість зберігалася в діапазоні 8,3–11,0%. Виявлено, що введення до складу ПР пшеничної соломи сприяє зниженню загальної вологості паливного рулону.

Таким чином, вилежування БССК у полі в умовах відсутності опадів є ефективним природним засобом зниження вологи перед ущільненням, а належні умови зберігання ПР є критично важливими для збереження якості біопалива. Раціональне управління вологістю як на етапі заготівлі, так і в процесі зберігання паливних рулонів безпосередньо впливає на енергоефективність і стабільність процесу спалювання.

4.1.2 Результати дослідження зміни вологості компактних паливних рулонів за різних умов зберігання. Паливні матеріали зберігаються в різних умовах: у критих складах, під накриттям тощо. У залежності від умов зберігання

може змінюватись температура та вологість у місці зберігання, тому для встановлення зміни вологості ПР при зберігання в різних умовах їх було розміщено у двох приміщеннях. У першому приміщенні ПР зберігались протягом одного тижня з вологістю 40-60% та температурою 20-24 °С. В іншому - зберігання протягом одного тижня за вологості 60-80% та температури середовища 16-20 °С. Результати дослідження подані у таблиці 4.7. За результатами зміни вологості ПР був складений графік зміни вологості (рис. 4.2).

Таблиця 4.7 - Вплив середовища на вологість ПР

| Склад рулонів | | |
|--|----------------------|----------------------|
| льон 100 % | льон 75%; солома 25% | льон 25%; солома 75% |
| Вологість перед початком зберігання, % | | |
| 9,1 | 8,7 | 8,3 |
| Вологість рулонів, % після зберігання у приміщенні з вологістю 40-60% та температурою 20-24 °С протягом одного тижня | | |
| 8,36 | 8,13 | 7,43 |
| Вологість рулонів, % Після зберігання у приміщенні з вологістю 60-80% та температурою 16-20 °С протягом одного тижня | | |
| 10,0 | 10,3 | 10,4 |

Встановлено, що зберігання ПР у сухому середовищі сприяє поступовому зменшенню вологості ПР, що покращує їхні енергетичні характеристики. Водночас зберігання у вологому середовищі призводить до інтенсивного вбирання вологи, що може негативно впливати на якість палива та його горючі властивості.

Дослідження впливу умов зберігання показало, що зберігання ПР у сухому середовищі (вологість 40–60%, температура 20–24 °С) веде до додаткового зниження вологості (в межах 0,6–0,9% залежно від складу рулону), що є позитивним чинником для подальшого використання палива. Натомість зберігання у вологому середовищі (вологість 60–80%, температура 16–20 °С) призводить до зворотного ефекту — зростання вологості до 10,0–10,4%.

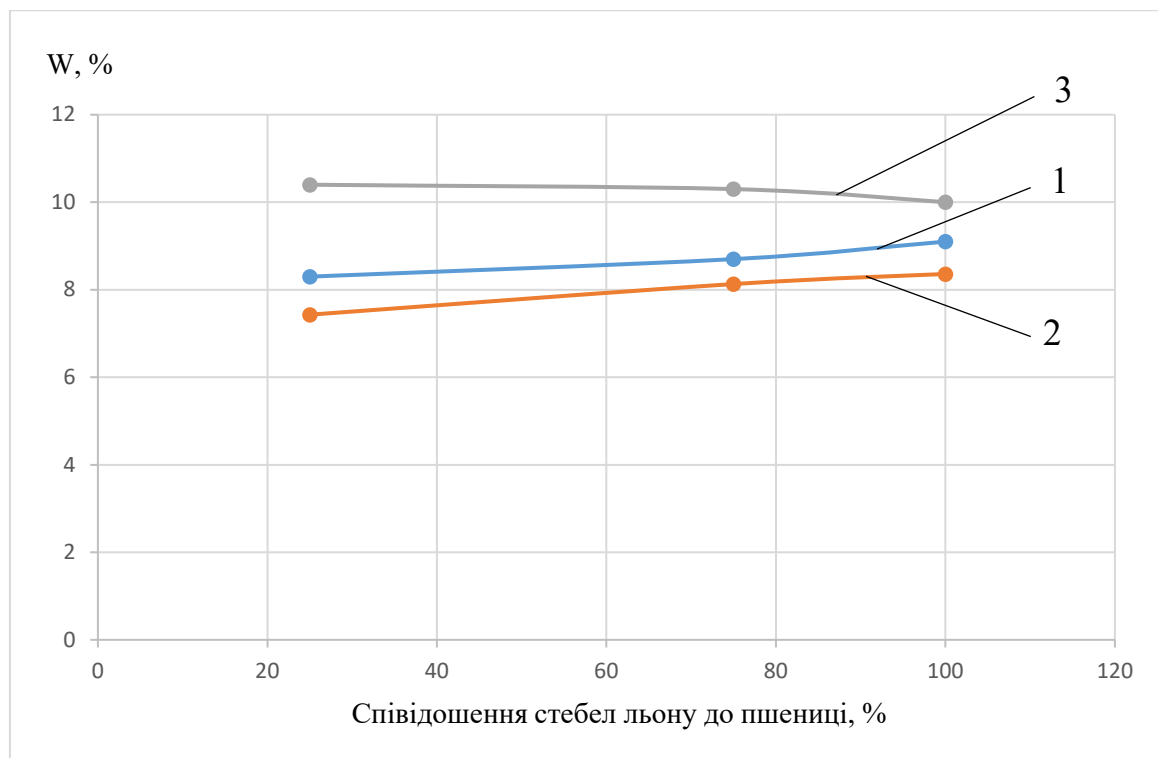


Рисунок 4.2 - Зміна вологості ПР за різних умов зберігання: 1 – перед початком зберігання; 2 - зберігання у приміщенні з вологістю 40-60%; 3 - зберігання у приміщенні з вологістю 60-80%

Таким чином, вилежування БССК у полі в умовах відсутності опадів є ефективним природним засобом зниження вологи перед ущільненням, а належні умови зберігання ПР є критично важливими для збереження якості біопалива. Раціональне управління вологістю як на етапі заготівлі, так і в процесі зберігання паливних ролонів безпосередньо впливає на енергоефективність і стабільність процесу спалювання.

4.3 Результати дослідження впливу пружних властивостей біомаси стебел сільськогосподарських культур на їх відновлення

Складність формування циліндричних пакунків пов'язана з пружними властивостями сільськогосподарських матеріалів, які виникають після зняття навантаження. Дослідження проводились із стебел льону олійного, льону-довгунця та пшениці за вологості 15; 16,5; 13% відповідно. Вплив пружних властивосте БССК

на її відновлення визначали методом описаним в розділі 3.3. Результати дослідження оброблялись математико-статистичними методами, похибка досліду в середньому склала 0,5% - 1%.

Результати досліджень для оцінювання пружних властивосте БССК льону та пшениці представленні у табл. 4.8 та рис. 4.3. За отриманими даними було побудовано графічні залежності, що характеризують процеси релаксації, вони показані на рис. 4.3. Досліджували зразки біомаси льону олійного, льону-довгунця та пшениці: а) стебла на початковій стадії збирання льону олійного; б) стебла на початковій стадії збирання льону-довгунця; в) стебла пшениці.

Таблиця 4.8 – Зміна товщини шару стебел

| Навантаження, мПа | Льон олійний, товщина шару стебел, мм | | | Льон-довгунець, товщина шару стебел, мм | | | Пшениця, товщина шару стебел, мм | | |
|-------------------|---------------------------------------|---------------|------|---|---------------|------|----------------------------------|---------------|------|
| | до | момент зняття | 60 с | до | момент зняття | 60 с | до | момент зняття | 60 с |
| 250 | 1,9 | 1,25 | 1,7 | 1,9 | 1,3 | 1,75 | 2,3 | 1,5 | 2.2 |

З таблиці 4.8 можна зробити висновок, що після дії навантаження стебла сільськогосподарських культур змінюють свої геометричні розміри. Варто зазначити, що після зняття навантаження стебла відновлюють свої розміри не повністю, їх товщина зменшується на 10-15%, після того як пройшло більше ніж 60 секунд стебла практично не змінювали свої розміри.

На рис. 4.3 показані криві, які характеризують процес відновлення БССК. Вони вказують на значні пружні властивості матеріалу, особливо це видно на стеблах пшениці оскільки вона має більші пружні властивості.

Проведені дослідження показали, що після зняття навантаження в 250 мПа товщина шару стебел зменшується в середньому на 34–47% від початкової, а після 60 секунд релаксації частково відновлюється, але залишається на 10–15% меншою за вихідну. Так, для льону олійного товщина зменшилась з 1,9 мм до 1,25 мм і відновилась до 1,7 мм, для льону-довгунця – з 1,9 мм до 1,3 мм і 1,75 мм відповідно, для пшениці – з 2,3 мм до 1,5 мм і 2,2 мм. Отримані результати підтверджують значний вплив пружних властивостей БССК на формування ПР.

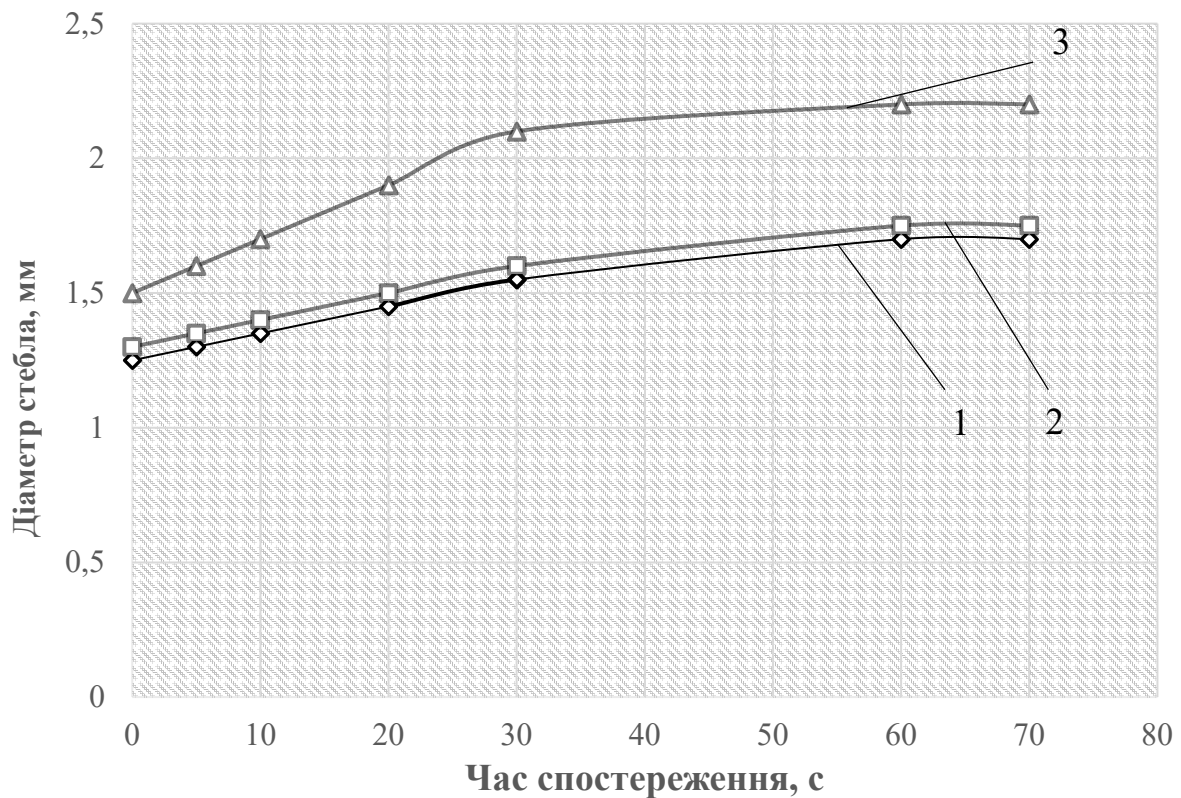


Рисунок 4.3 – Залежності, що характеризують процеси релаксації стебел сільськогосподарських культур: 1 – льон олійний; 2 – льон-довгунець; 3 – пшениця

Найбільшу пружність виявлено у пшеничних стебел, що свідчить про доцільність їх подрібнення до дрібніших фракцій і використовувати як наповнювач. Натомість стебла льону, особливо довгунця, доцільно використовувати як в'язучий компонент для забезпечення цілісності рулону без обв'язування. Результати досліджень підтверджують доцільність максимального руйнування БССК на всіх етапах збирання для формування ПР без обв'язування.

4.4 Зусилля подрібнення біомаси стебел колосових культур та льону

У дослідженнях з виготовлення ПБ на величину різання увагу звернено на стебла льону олійного, льону-довгунця, пшениці озимої. У процесі оброблення даних експериментів, проведених на стенді представленому в розділі 3 пункті 4 отримані результати. Дослідження проводились у триразовій повторюваності, похибка досліду склала 5%. Вологість суттєво впливає на опір різанню стебел

сіськогосподарських культур. Тому, під час проектування машин та розробки процесів оброблення важливо враховувати вологість БССК.

У дослідженнях особливу увагу звертали на величину зусилля різання стебел сіськогосподарських культур на трьох ділянках: біля кореня, середній та верхній частині стебла. На рис. 4.4, 4.5, 4.6 зображені залежності зусилля різання стебел.

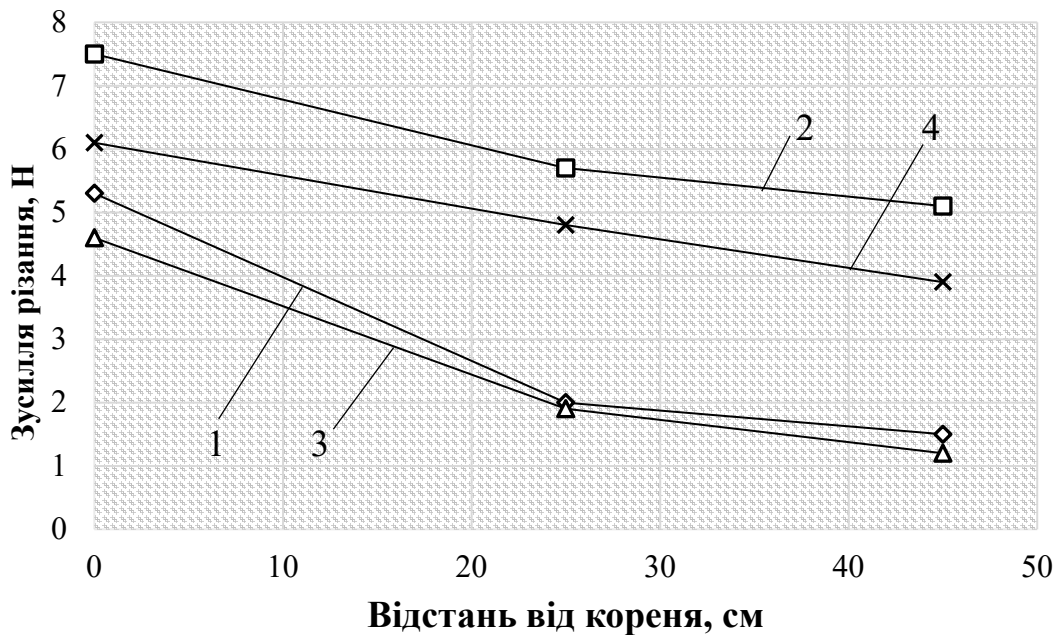


Рисунок 4.4 - Залежності зусилля різання стебел льону олійного: 1 –1 стебло, вологість 15,6%; 2 - 5 стебел, вологість 15,6%; 3 – 1 стебло, вологість 54,2%; 4 - 5 стебел, вологість 54,2%;

Зусилля різання льону олійного зменшуються зі збільшенням відстані від кореня як для одного стебла, так і для пучків із п'яти стебел. Вологість матеріалу суттєво впливає на цей показник: при однаковій кількості стебел та однакових точках віддалення від кореня зусилля різання при вологості 15,6% значно перевищує значення, отримані для вологості 54,2%. Найбільше зусилля різання спостерігається для пучка з п'яти стебел при вологості 15,6%, що зменшується від кореня з 7,5 Н до 5,1 Н, для одного стебла зменшується від 5,3 Н до 1,5 Н. У той час за вологості

54,2% зусилля різання для пучка з п'яти стебел зменшується від 6,2 Н до 3,9, для одного стебла зменшується з 4,6 Н до 1,2 Н. Це свідчить про те, що зі зростанням вологості та віддаленням від кореневої частини стебла льон стає більш податливим до різання, що необхідно враховувати при виборі конструкції та режимів роботи ріжучих елементів.

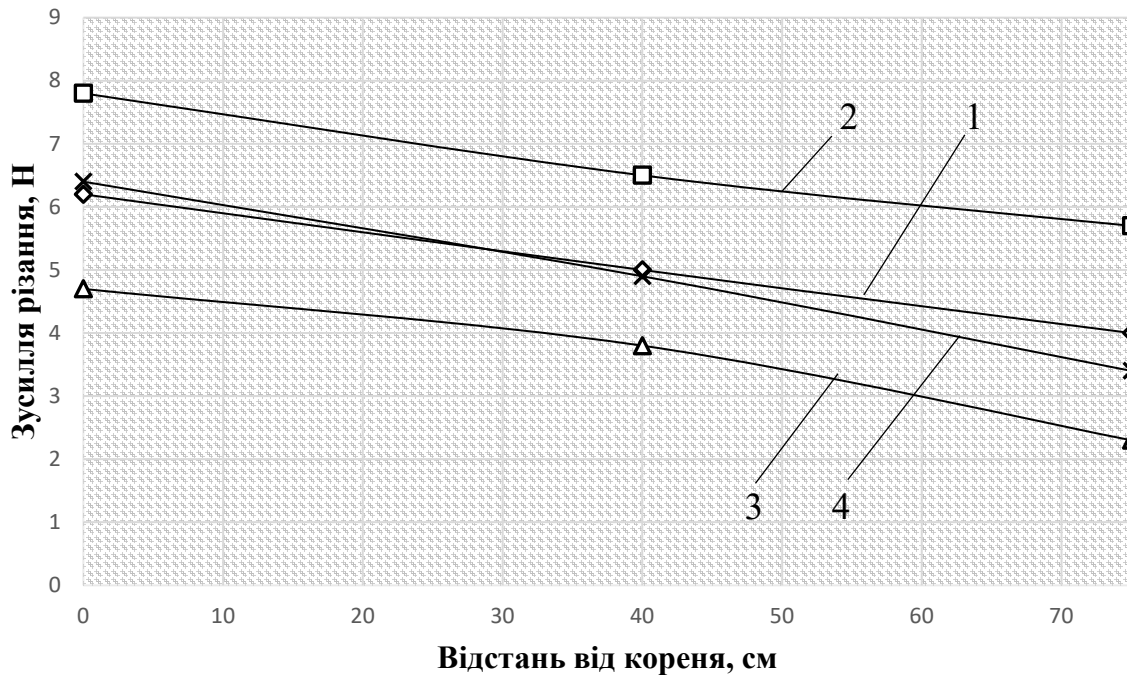


Рисунок 4.5 - Залежності зусилля різання стебел льону-довгунця: 1 - 1 стебло, вологість 19,4%; 2 – 5 стебел, вологість 19,4%; 3 – 1 стебло, вологість 56%; 4 – 5 стебел, вологість 56%

Аналіз графіка показує, що зусилля різання льону-довгунцю також зменшуються зі збільшенням відстані від кореня для всіх варіантів дослідження. Найвищі значення зафіксовано при різанні пучка з п'яти стебел за вологості 19,4%. Вони зменшуються від кореня до основи з 7,8 Н до 5,7 Н. Значення для одного стебла – з 6,2 Н до 4 Н.

За вологості 56% зусилля нижче: для пучка з 5 стебел зменшуються від 6,4 Н до 3,4, для одного стебла з 4,7 Н до 2,3 Н. Це свідчить про зниження міцності волокна із підвищенням вологості та віддаленням від кореня, що варто враховувати при налаштуванні ріжучих елементів машин для збирання та переробки льону.

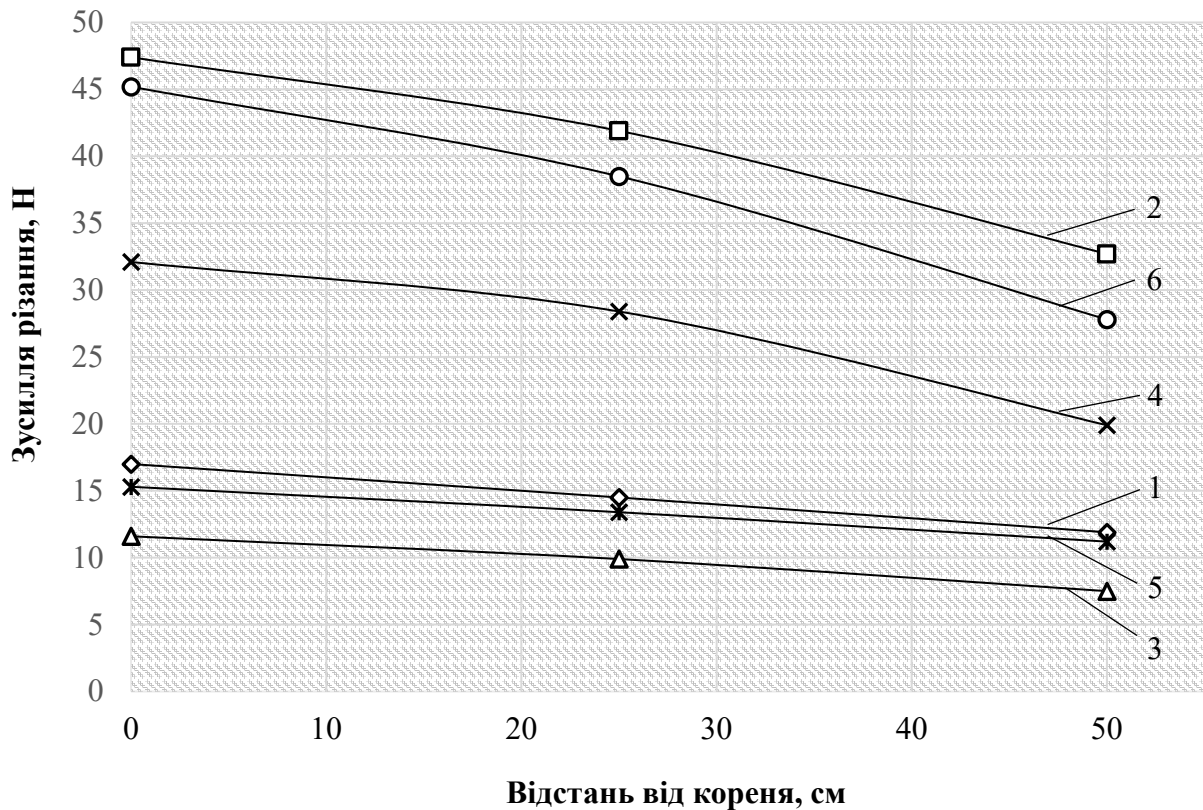


Рисунок 4.6. Залежності зусилля різання стебел колосових: 1 - одне стебло, вологість 12,1%; 2 – п'ять стебел, вологість 12,1%; 3 – одне стебло, вологість 56,8%; 4 – п'ять стебел, вологість 56,8%; 5 – пшениця яра, одне стебло, вологість 17,8%; 6 – пшениця яра, п'ять стебел, вологість 17,8%;

Зусилля різання стебел пшениці так як і для льону зменшується зі збільшенням відстані від кореня. Для озимої пшениці при вологості 12,1% і одному стеблi зусилля різання знижується з 17 Н до 12,9 Н. При п'яти стеблах це зусилля зменшується з 47,4 Н до 32,7 Н. За підвищеної вологості 56,8% зусилля різання менше, так для одного стебла озимої пшениці зусилля зменшується з 11,6 Н до 7,5 Н, а для пучка з 5 стебел з 32,1 Н до 19,9 Н. Для ярої пшениці при вологості 17,8% зусилля різання при п'яти стеблах змінюється від 45,2 Н до 27,9 Н. При підвищенні вологості і збільшенні відстані від кореня зменшується необхідна сила різання.

У результаті проведених досліджень встановлено, що зі зменшенням вологості стебел сільськогосподарських культур зусилля різання зростає, що пов'язано з підвищенням жорсткості та опору волокон. Для льону олійного зменшення

вологості з 54,2% до 15,6% призводить до зростання зусилля різання одного стебла з 1,2 Н до 1,5 Н (на верхній ділянці) і з 4,6 Н до 5,3 Н (біля кореня); аналогічно для пучка з п'яти стебел — з 3,9 Н до 5,1 Н (верхня частина) і з 6,1 Н до 7,5 Н (корінь).

Для льону-довгунця зменшення вологості з 56% до 19,4% спричинило збільшення зусилля різання одного стебла з 2,3 Н до 4 Н, а для п'яти стебел — з 3,4 Н до 5,7 Н. Найбільшу різницю в зусиллях виявлено у пшениці озимої: при зниженні вологості з 56,8% до 12,1% зусилля різання одного стебла зростає з 7,5 Н до 11,9 Н (верхня частина) і з 11,6 Н до 17 Н (біля кореня), а для п'яти стебел — з 19,9 Н до 32,7 Н і з 32,1 Н до 47,4 Н відповідно. Зниження вологості БССК призводить до збільшення зусилля різання в середньому на 30–50%.

4.5 Результати дослідження щільності компактних паливних рулонів виготовлених у камері змінного об'єму методом математичного планування експерименту

Щільність є визначальним показником якості для компактних паливних рулонів. Вона впливає на теплотворну здатність ПР, їх транспортування та зберігання. Встановлено, що такі технологічні параметри впливають на щільність ПР: тиск, створюваний роликками в КПЗО (P , МПа), об'єм погонного метра БССК, що подається в КПЗО (v , м³), вмісту стебел льону в БССК, що подається у КПЗО, від щільності отриманого ПР (m , %).

Дослідження впливу тиску в КПЗО, об'єму погонного метра БССК, що надходить у камеру пресування та вмісту стебел льону у ПР на його щільність проводили методом математичного планування експерименту.

Експеримент, проведений за планом Бокса-Бенкена, дозволив отримати математичну модель, що описує залежність щільності ПР від технологічних параметрів у вигляді рівняння регресії. Результати трифакторного експерименту обробляли відповідно до трирівневого плану другого порядку за допомогою програми, розробленої в середовищі Mathcad.

Таблиця 4.9 - Результати проведення експерименту за планом Бокса-Бенкена

| Номер досліду | P, МПа | V, м ³ | m, % | Середнє значення ρ , кг/м ³ |
|---------------|--------|-------------------|------|---|
| 1 | 0,60 | 0,8 | 50 | 119,067 |
| 2 | 0,50 | 0,8 | 50 | 107,167 |
| 3 | 0,60 | 0,6 | 50 | 124,933 |
| 4 | 0,50 | 0,6 | 50 | 113,233 |
| 5 | 0,60 | 0,7 | 75 | 128,167 |
| 6 | 0,50 | 0,7 | 75 | 115,133 |
| 7 | 0,60 | 0,7 | 25 | 112,533 |
| 8 | 0,50 | 0,7 | 25 | 103,100 |
| 9 | 0,55 | 0,8 | 75 | 122,300 |
| 10 | 0,55 | 0,6 | 75 | 127,233 |
| 11 | 0,55 | 0,8 | 25 | 106,100 |
| 12 | 0,55 | 0,6 | 25 | 112,067 |
| 13 | 0,55 | 0,7 | 50 | 119,400 |
| 14 | 0,55 | 0,7 | 50 | 119,200 |
| 15 | 0,55 | 0,7 | 50 | 118 900 |

План експерименту Бокса-Бенкена дозволив ефективно дослідити вплив трьох незалежних змінних (технологічних параметрів) на змінну відгуку (щільність утвореного ПР). Рівняння регресії в кодованих факторах (табл. 3.1):

$$\rho = 119.2 + 5.8X_1 - 2.8X_2 + 7.4X_3 + 0.9X_1X_3 - 2.6X_1^2 - 1.8X_3^2, \quad (4.1)$$

Однорідність дисперсійного ряду оцінювали за допомогою критерію Кохрену. Розраховане значення $G_{res} = 0.19$ порівнювали з табличним $G_{tab} = 0.335$ (для $\alpha = 0.05, f_1 = 10, f_2 = 3$) і альтернативне табличне значення 0,373. З $G_{res} < G_{tab}$ цього можна зробити висновок, що експериментальний процес є відтворюваним. Адекватність рівняння регресії (4.1) перевіряли за допомогою F -критерію Фішера. Розраховане значення F -критерію становило $F_{res} = 16.196$, засноване на дисперсії неадекватності $S_{nead}^2 = 1.026$ та дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 0.063$. Табличне значення критерію Фішера на рівні значущості 5% ($= 0.05$) зі ступенями свободи $f_1 = 2, f_2 = 7$ становило $F_{table} = 19.4$. Оскільки $F_{res} < F_{tab}$ було підтверджено, що

регресійна модель є адекватною.

Використовуючи задані основні рівні ($P_0 = 0,55$ МПа, $V_0 = 0,7$ м³, $m_0 = 50$ %) та відповідні діапазони варіації ($\Delta P = 0,05$, $\Delta V = 0,1$, $\Delta m = 25$), рівняння в кодованих факторах було перетворено в рівняння з натуральними змінними. Отримане рівняння, виражене в натуральних факторах P (тиск, МПа), V (об'єм погонного метра БССК, м³) і m (вміст стебел льону, %)

$$\rho = -224.4 + 1240P - 28.5V + 0.19m + 0.72P * m - 1038.2P^2 - 0.003m^2. \quad (4.2)$$

Поверхні відгуку, представлені на рис. 4.7 та рис. 4.8 та їх контурні графіки - рис. 4.8 та рис. 4.10 побудовані за рівнянням регресії (4.2). Поверхня відгуку рис. 4.7 та контурна еюра поверхні рис. 4.9 ілюструють зв'язок між щільністю ПР та двома змінними: тиском, що прикладається роликками в (P , МПа) та об'ємом погонного метра БССК (V , м³), що подається в камеру.

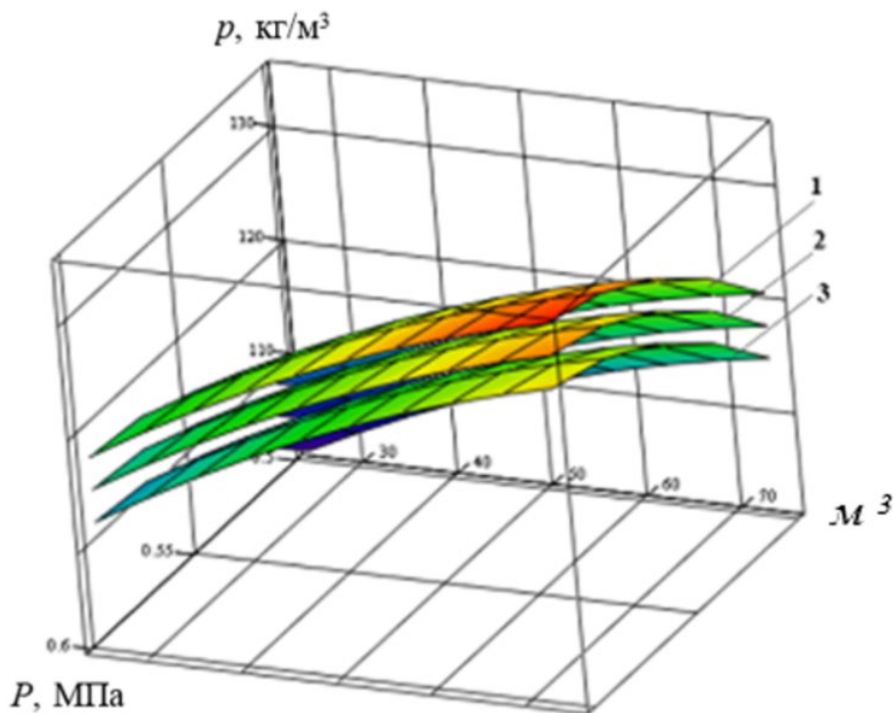


Рисунок 4.7 - Результати дослідження залежності щільності ПР від тиску, створюваного роликками в КПЗО (P , МПа) та вмісту стебел (m , %), поверхня відгуку:

$$1 - V = 0,6 \text{ м}^3; 2 - V = 0,7 \text{ м}^3; 3 - V = 0,8 \text{ м}^3$$

Поверхня відгуку показує чітку тенденцію, коли підвищення тиску в камері пресування (P) призводить до значного збільшення щільності ПР. Це видно з висхідного нахилу поверхні, коли значення тиску зростають і навпаки, збільшення об'єму біомаси (V) має тенденцію до зменшення щільності, як це представлено нахилом поверхні вниз у напрямку більших об'ємів біомаси. Ця взаємодія вказує на те, що вищий тиск стискає матеріал ефективніше, тоді як більші об'єми біомаси мають тенденцію протистояти стисненню, що призводить до меншої щільності.

Контурна епіюра (рис. 4.8) надає детальне уявлення про те, як комбінації тиску та об'єму біомаси впливають на щільність. Взаємодія між тиском і об'ємом біомаси вказує на те, що підтримання помірною об'єму біомаси (приблизно $0,6-0,7 \text{ м}^3$) при збільшенні тиску до значень близько $0,58-0,6 \text{ МПа}$ дає найвищу щільність. Це важливо для досягнення ПР зі $m, \%$ структурною цілісністю, оскільки щільність безпосередньо корелює з ефективністю згоряння та енергетичним потенціалом.

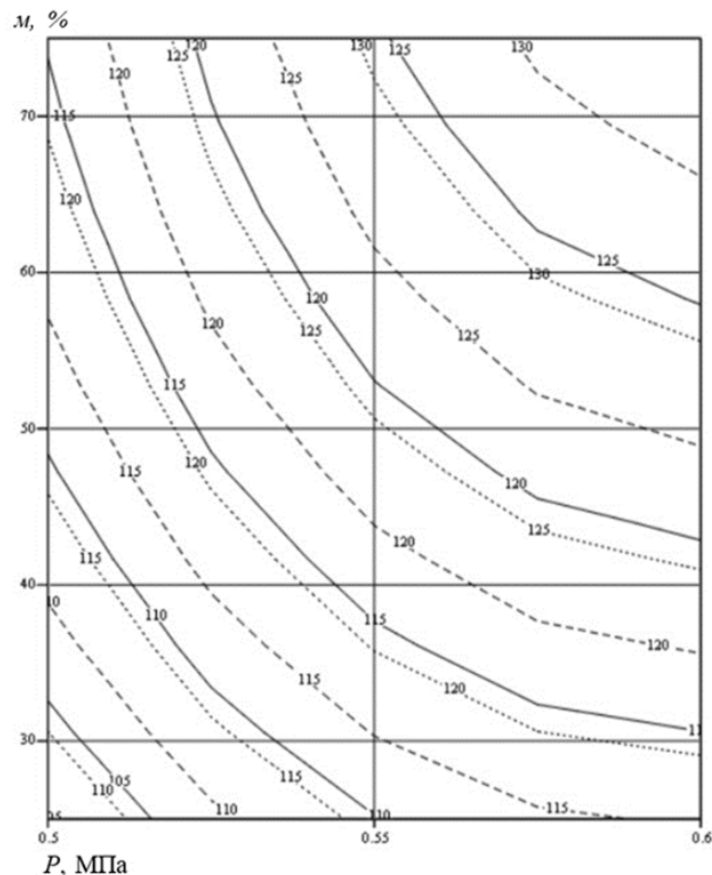


Рисунок 4.8 - Контурна епіюра поверхні відгуку

Зображення (рис. 4.9, 4.10) демонструють візуалізацію дослідження, яке аналізує залежність щільності ПР (ρ) від тиску (P , МПа) роликів у КПЗО та вмісту стебла льону в ПР (m , %), для трьох різних складів матеріалів: ПР75/25, ПР50/50 і ПР25/75. Для всіх складів матеріалів щільність збільшується з більшим тиском роликів (P). Склад ПР- Л75/П25, яка містить більшу частку стебел льону, забезпечує вищу щільність порівняно з Л50/П50 і Л25/П75 за аналогічних умов. Це пов'язано з волокнистою природою льону, яка покращує когезію матеріалу під час стиснення.

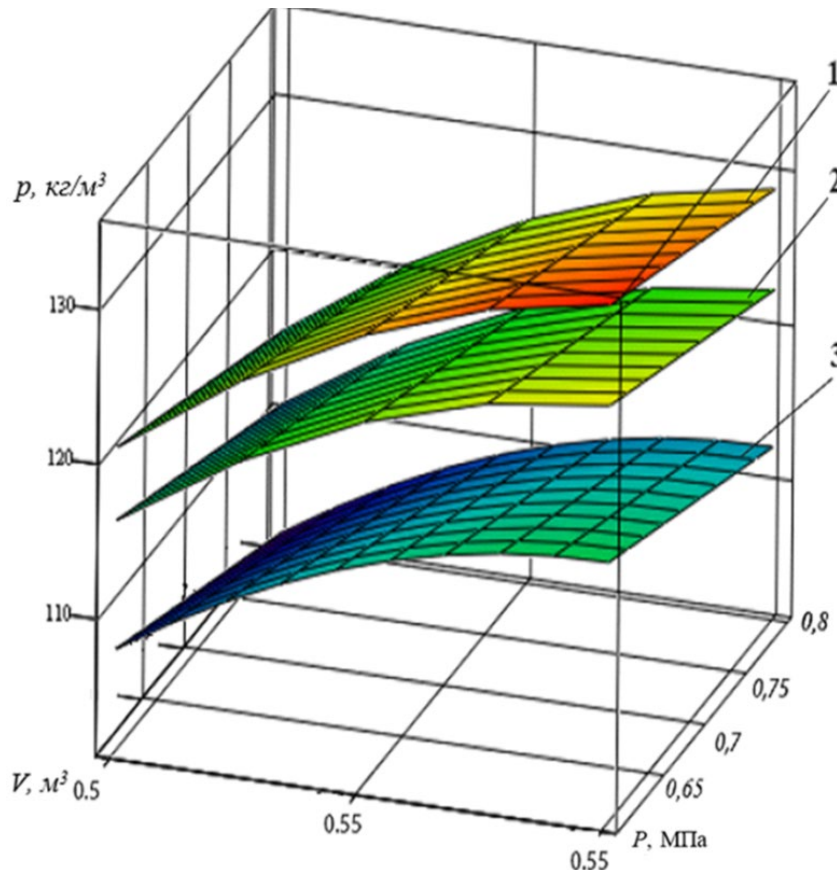


Рисунок 4.9 - Результати дослідження залежності щільності ПР від тиску, створюваного роликками у КПЗО (P , МПа) та об'єму погонного метра БССК (V , m^3), поверхня відгуку: 1- Л75/П25, 2- ПР Л50/П50, 3- Л25/П75

Контурна епіюра (рис. 4.10) надає вид зверху вниз поверхні відгуку, показуючи лінії щільності як функцію P і V . Ці контури чітко ілюструють, як змінюється щільність у визначеному просторі параметрів.

Відстань між контурними лініями свідчить про те, що вплив збільшення P на ρ стає менш вираженим при більш високих тисках, що вказує на потенційну точку насичення ефективності ущільнення.

При таких значеннях забезпечується механічна стабільність рулонів і належна ефективність згоряння. Рекомендовані діапазони тиску для різних сумішей:

- Л75/П25 (75% стебла льону, 25% інші матеріали): 0,50–0,55 МПа;
- Л50/П50 (50% стебла льону, 50% інші матеріали): 0,45–0,55 МПа;
- Л25/П75 (25% стебла льону, 75% інші матеріали): 0,40–0,50 МПа;

Раціональними об'ємами біомаси для досягнення необхідної щільності без погіршення когезії матеріалу:

- Л75/П25: 0,7–0,75 м³;
- Л50/П50: 0,65–0,7 м³;
- Л25/П75: 0,65–0,7 м³;

Перед ущільненням біомаса повинна мати вологість у межах 10–15%. Надмірна вологість знижує теплотворну здатність палива та підвищує витрати на сушіння, тоді як надто низька вологість погіршує когезію матеріалу та ускладнює ущільнення. Контроль вологості у цьому діапазоні сприяє утворенню міцних зв'язків між волокнами, що забезпечує ефективність пресування та стабільність згоряння.

Паливні рулони повинні бути достатньо компактними для забезпечення ефективного згоряння, але й зручними у транспортуванні та завантаженні в твердопаливні котли. Рекомендовані геометричні параметри: діаметр 50–70 мм, довжина 500–900 мм. Щільність 120–130 кг/м³ забезпечує достатню міцність під час транспортування й зберігання, а також добру повітропроникність для повного згоряння. Обраний тиск ущільнення 0,45–0,55 МПа є раціональним, оскільки вищі значення практично не дають додаткового приросту щільності, що підтверджено побудовами поверхонь відгуку. Діапазон вологості 10–15% дозволяє зберігати високу теплотворну здатність біопалива при збереженні технологічної пластичності сировини в процесі формування рулонів.

Запропоновані технологічні параметри створюють підґрунтя для раціонального виробництва паливних рулонів із біомаси стебел сільськогосподарських культур, забезпечуючи енергоефективність, механічну цілісність та сталість процесів виробництва.

4.6 Результати дослідження продуктів згоряння паливних брикетів різного складу в лабораторних умовах

Дослідження продуктів згоряння паливних брикетів (табл. 4.3), а саме витяжок зольного залишку проводили за методикою описаною в підрозділі 3.7. Для дослідження було використано чотири витяжки залишків горіння паливних брикетів. Витяжки фільтрувати. Залишки фільтрування показані на рис. 4.11. Кювету №2 заповнювали нульовим розчином.

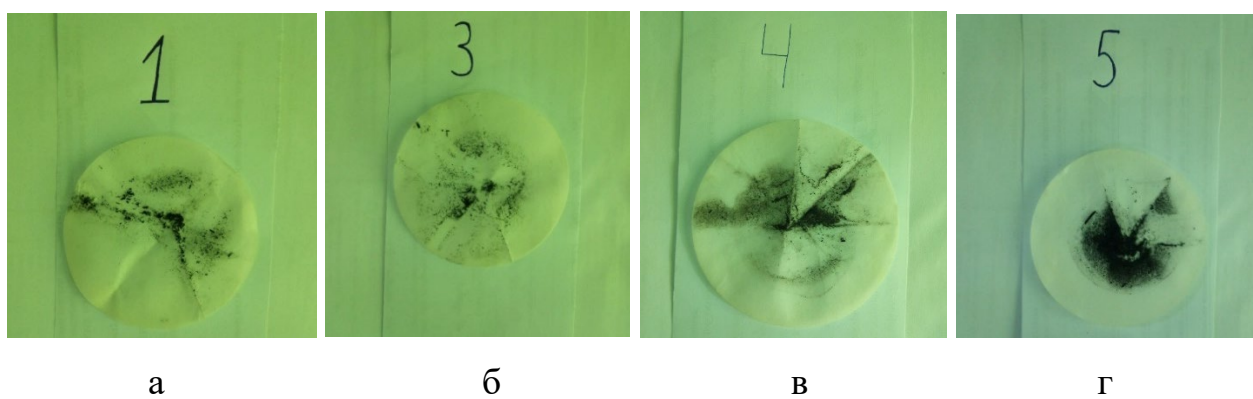


Рисунок 4.11 - Залишки фільтрування: а – Л50/П50; б –Л75/П25; в – Л25/П75; г -
деревина

Далі фільтровані зразки витяжок (рис. 4.12) поміщали в кювети та проводили дослідження спектрів витяжок залишків горіння ПБ різного складу за допомогою спектрофотометра.

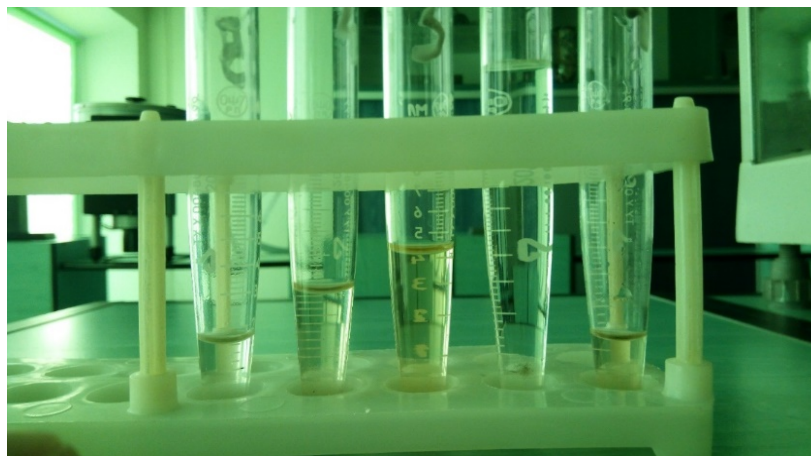


Рисунок 4.12 - Відфільтровані зразки витяжок залишків горіння

Під час проведення дослідження отримали спектри пропускання світла певної довжини хвилі у витяжках залишків горіння ПБ різного складу. Отримані дані внесені в таблицю 4.10. Спектри досліджували в діапазоні довжин хвиль 300–850 нм, прилад встановлювали на режим пропускання Т %.

Таблиця 4.10 - Значення максимальних (мінімальних) відсотків пропускання світла певної довжини хвилі

| Л50/П50 | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Пропускання Т, % | 33,25 | 75,01 | 75,20 | 81,68 | 83,15 | 86,97 | 90,22 | 91,83 | 94,76 |
| Довжина хвилі, нм | 410 | 539 | 540 | 599 | 625,5 | 660 | 710 | 745 | 843 |
| Л75/П25 | | | | | | | | | |
| Пропускання Т, % | 44,72 | 82,3 | 82,84 | 87,90 | 89,20 | 90,85 | 92,03 | 93,03 | 94,42 |
| Довжина хвилі, нм | 410 | 539 | 540 | 599 | 625,5 | 660 | 710 | 745 | 843 |
| Л25/П75 | | | | | | | | | |
| Пропускання Т, % | 37,55 | 69,33 | 69,46 | 75,28 | 76,88 | 79,49 | 81,60 | 82,99 | 85,84 |
| Довжина хвилі, нм | 410 | 539 | 540 | 599 | 625,5 | 667 | 710 | 745 | 843 |
| Деревина | | | | | | | | | |
| Пропускання Т, % | 41,37 | 76,75 | 76,87 | 82,47 | 84,08 | 86,94 | 89,07 | 90,5 | 93,31 |
| Довжина хвилі, нм | 410 | 539 | 540 | 599 | 625,5 | 667 | 710 | 745 | 843 |

На рис. 4.13. відображено спектри пропускання чотирьох досліджуваних зразків витяжок із зольних залишків продуктів горіння ПБ.

Результати спектрофотометричного аналізу витяжок із зольних залишків паливних брикетів із біомаси стебел сільськогосподарських культур свідчать про істотну залежність якості продуктів згоряння від складу сировини. Зразок з найбільшим вмістом соломи пшениці (Л25/П75) мав найнижчі значення пропускання світла у всьому досліджуваному діапазоні довжин хвиль (410–843 нм), що вказує на підвищений вміст нерозчинних компонентів і потенційно нижчу чистоту зольного залишку. У цього зразка також спостерігалася наявність осаду після фільтрації.

Натомість зразок із переважанням льону (Л75/П25) показав найвищі показники пропускання, що свідчить про чистіший мінеральний склад золи та меншу кількість залишкових домішок. Цей зразок мав найоднорідніший спектр, а витяжка не містила осаду. Зразок Л50/П50, у свою чергу, продемонстрував спектральні характеристики, близькі до контрольного зразка (деревина), що вказує на раціональне поєднання біомаси для якісного горіння.

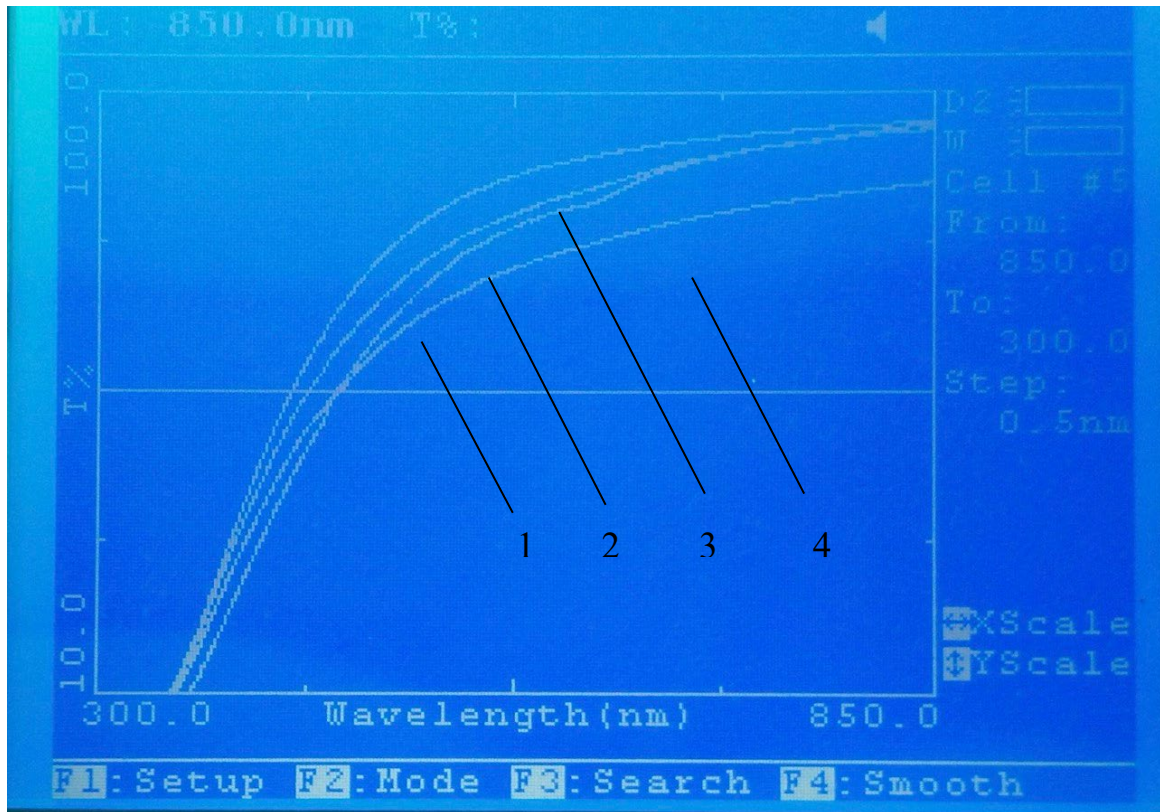


Рисунок 4.13 - Спектри пропускання витяжок загальних залишків горіння:

1 - Л50/П50; 2 – деревина; 3 - Л75/П25; 4 - Л25/П75;

Таким чином, збільшення частки льону в складі паливних брикетів покращує однорідність та екологічну чистоту продуктів згорання, тоді як надмірний вміст соломи пшениці знижує ці показники. Використані зразки у вигляді паливних брикетів дозволяють зробити висновок про доцільність застосування відповідних співвідношень біомаси стебел сільськогосподарських культур у виробництві паливних рулонів. Формування паливних рулонів із вмістом льону не менше 50% є доцільним як з енергетичної, так і з екологічної точки зору.

4.7 Результати дослідження показників якості та екологічності компактних паливних рулонів у виробничих умовах

Важливими показниками якості та екологічної безпеки твердого біопалива є кількісний і якісний склад димових газів від згорання. Дослідження проводились за методикою описаною в п. 3.8 за допомогою портативного газоаналізатора Testo 340. Результати дослідження горіння зразків твердого біопалива – ПБ та ПБ в представлені у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 - Результати дослідження горіння зразків твердого біопалива – ПБ та ПБ

| | Параметр | Вимірне значення | | |
|---|-----------------------------------|------------------|---------|---------|
| | | Л75/П25 | Л50/П50 | Л25/П75 |
| 1 | Вміст вологи, % | 11 | 10 | 9 |
| 2 | Значення теплового ККД, Гкал /год | 0.420 | 0.394 | 0.367 |
| 3 | Зольність, % | 2.3 | 1,8 | 1,8 |
| 5 | CO ₂ , % | 8,61 | 7,7 | 6,8 |
| 6 | O ₂ , % | 9,0 | 10,3 | 11,5 |
| 7 | CO, ppm | 2131 | 1210 | 950 |
| 8 | SO ₂ , ppm | 52 | 44 | 38 |
| 9 | NO _x , ppm | 68 | 62 | 57 |

Результати випробування у виробничих умовах отримали у котельні спорткомплексу Луцького національного технічного університету, виміряні значення наведені в таблиці 4.12, вони підтверджують доцільність використання ПР із відходів БССК, а саме стебел льону та колосових зернових як альтернативного палива для твердопаливних котлів. Котельня обладнана типовим водогрійним котлом KALVIS–400. Це промисловий твердопаливний водогрійний котел із ручним завантаженням палива, пристосований для топлення дровами, відходами деревини, ПБ, кам'яним вугіллям та іншими кусковим паливом. Експлуатаційні характеристики твердопаливного котла KALVIS–400 наведені у додатку Е.

Таблиця 4.12. Результати випробування горіння ПР у виробничих умовах

| № П/П | Найменування параметрів | Одиниця вимірювання | деревина | 75%/25% льон/пшениця | 50/50% льон/пшениця | 25%/75% льон/пшениця |
|-------|--|-----------------------|----------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Теплопродуктивність котла | Гкал/год | 0,388 | 0,420 | 0,394 | 0,367 |
| 2 | Температура відхідних газів | °С | 129 | 129 | 128 | 128 |
| 3 | Вміст у вихідних газах: | | | | | |
| | CO ₂ | % | 8,2 | 8,61 | 7,7 | 6,8 |
| | O ₂ | % | 9,6 | 9,0 | 10,3 | 11,5 |
| | CO | ppm | 2604 | 2131 | 1210 | 950 |
| | SO ₂ | ppm | 47 | 52 | 44 | 38 |
| | NO _x | ppm | 75 | 68 | 62 | 57 |
| 4 | Коефіцієнт надлишку повітря | | 1,57 | 1,52 | 1,66 | 1,83 |
| 5 | Втрати тепла: | | | | | |
| | - з відхідними газами | % | 9,05 | 8,72 | 7,73 | 10,75 |
| | - з хімічним недопалом | % | 1,874 | 1,471 | 0,942 | 0,839 |
| | - з механічним недопалом | % | 0,82 | 0,76 | 0,85 | 0,98 |
| | - з фізичною теплотою шлаків | % | 0,85 | 0,62 | 0,99 | 1,40 |
| | - в навколишнє середовище | % | 8,33 | 8,33 | 8,33 | 8,33 |
| 6 | ККД котла "брутто" | % | 80,74 | 81,47 | 81,16 | 80,07 |
| 7 | Витрата палива | кг/год | 129 | 129 | 128 | 128 |
| 8 | Питома витрата умовного палива на 1Гкал виробленого тепла: | кг.ум.пал/Гкал. | 174,92 | 175,33 | 176,01 | 178,40 |
| 9 | Економія питомої витрати умовного палива | кг.ум.пал/Гкал. | | 1,59 | 0,91 | -1,48 |
| 10 | Кількість годин роботи котла | год. | 4380 | 4380 | 4380 | 4380 |
| 11 | Сер.річний коефіцієнт завантаження котла | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | Річна економія умовного палива | т.у.п./рік | | 2,925 | 1,570 | -2,379 |
| 13 | Концентрація NO _x , приведена до нормальних умов та O ₂ = 3% | мг/м ³ | 369,45 | 321,20 | 330,38 | 344,52 |
| 14 | Концентрація CO, приведена до нормальних умов та O ₂ = 3% | мг/м ³ | 7847,58 | 6158,12 | 3944,65 | 3512,97 |
| 15 | Часовий викид NO _x | кг/год | 0,062 | 0,058 | 0,056 | 0,055 |
| 16 | Часовий викид CO | кг/год | 1,311 | 1,106 | 0,667 | 0,561 |
| 17 | Зниження часового викиду NO _x | кг/год | | 0,0036 | 0,0035 | 0,0034 |
| 18 | Зниження часового викиду CO | кг/год | | 1,450 | 0,874 | 0,735 |
| 19 | Зниження валового викиду NO _x | кг/рік | | 15,75 | 15,21 | 14,94 |
| 20 | Зниження валового викиду CO | кг/рік | | 6350,85 | 3830,03 | 3221,36 |
| 21 | Річна економія натурального палива | т.м ³ /рік | | 0,977 | 0,526 | 0,808 |

Аналіз результатів промислового випробування спалювання ПР із БССК льону та пшениці у твердопаливному котлі типу KALVIS-400 дозволив встановити їхні теплотехнічні та екологічні характеристики.

Під час експериментальних досліджень згорання твердого біопалива із БССК, зокрема паливних брикетів (ПБ) з льону та соломи пшениці, було визначено якісний

та кількісний склад димових газів за допомогою газоаналізатора Testo 340. Результати показали зниження викидів CO та NO_x зі збільшенням частки соломи пшениці в паливі, проте зі збільшенням частки соломи падає теплопродуктивні показники, загалом результати свідчить про екологічну доцільність такого біопалива. Промислові випробування у котельні на базі ЛНТУ підтвердили ефективність використання твердого біопалива - ПР із БССК. Зокрема, при пропорційному співвідношенні Л75/П25 досягнуто найкращих показників теплопродуктивності - 0,420 Гкал/год., далі іде Л50/П50 - 0,394 Гкал/год., останнім по теплопродуктивності йде співвідношення Л25/П75.

Пропорційне співвідношення льону та пшениці у складі паливного рулону значно впливає на екологічні показники викидів. Збільшення частки пшениці сприяє зниженню викидів CO та NO_x, що покращує екологічну ситуацію. Водночас оптимальне співвідношення для досягнення компромісу між ефективністю згоряння, тепловим ККД та екологічними показниками становить Л50/П50 або Л75/П25.

Проведені лабораторні та виробничі дослідження горіння паливних брикетів і паливних рулонів із біомаси стебел льону та соломи пшениці засвідчили значну залежність теплотехнічних і екологічних характеристик від складу сировини. Найвищу теплопродуктивність (0,420 Гкал/год) продемонстрували рулони зі співвідношенням Л75/П25, проте саме суміш Л50/П50 забезпечила найкращий компроміс між теплоефективністю та мінімальними викидами CO (1210 ppm) і NO_x (62 ppm). Збільшення частки пшениці сприяє зниженню забруднення, однак супроводжується зменшенням енергетичної продуктивності. Враховуючи результати випробувань у котлі KALVIS-400, рекомендованим є використання паливних рулонів із вмістом льону не менше 50%, що забезпечує баланс між ефективністю згоряння, екологічною безпечністю та економічною доцільністю.

Висновки до розділу 4

1. Із БССК отримано тверде паливо – паливні рулони (ПР) та паливні брикети (ПБ). Сировиною для ПР є стебла льону та пшениці, а для ПБ — подрібнені стебла. Досліджено склади: Л25/П75, Л50/П50, Л75/П25.

2. На основі проведених досліджень встановлено, що вилежування біомаси стебел сільськогосподарських культур (БССК) у польових умовах протягом кількох днів сприяє суттєвому зниженню її вологості. Так, після 5-денного періоду зберігання на полі за середньодобової температури 20–24 °С та відсутності опадів, вологість озимої пшениці знижується в середньому на 8,8 %, льону-довгунця – 7,7%, а льону олійного – 12,7%. Для паливних рулонів виготовлених із БССК у різному співвідношенні льону та соломи, вологість зберігалася в діапазоні 8,3–11,0%. Виявлено, що введення до складу ПР пшеничної соломи сприяє зниженню загальної вологості паливного рулону.

3. Дослідження впливу умов зберігання показало, що зберігання ПР у сухому середовищі (вологість 40–60%, температура 20–24 °С) веде до додаткового зниження вологості (в межах 0,6–0,9% залежно від складу рулону), що є позитивним чинником для подальшого використання палива. Натомість зберігання у вологому середовищі (вологість 60–80%, температура 16–20 °С) призводить до зворотного ефекту – зростання вологості до 10,0–10,4%.

4. Дослідження впливу пружних властивостей БССК показали, що після зняття навантаження в 250 мПа товщина шару стебел зменшується на 34–47% від початкової, а після 60 секунд релаксації частково відновлюється, але залишається на 10–15% меншою за вихідну. Так, для льону олійного товщина зменшилась з 1,9 мм до 1,25 мм і відновилась до 1,7 мм, для льону-довгунця – з 1,9 мм до 1,3 мм і 1,75 мм відповідно, для пшениці – з 2,3 мм до 1,5 мм і 2,2 мм. Найбільшу пружність виявлено у пшеничних стебел. Це свідчить про доцільність їх подрібнення до дрібніших фракцій і використання як наповнювача. Натомість стебла льону, особливо довгунця, доцільно використовувати як в'язучий компонент для забезпечення цілісності рулону без обв'язування.

5. Зі зменшенням вологості стебел сільськогосподарських культур зусилля різання зростає, що пов'язано з підвищенням жорсткості та опору волокон. Для льону олійного зменшення вологості з 54,2% до 15,6% призводить до зростання зусилля різання одного стебла з 1,2 Н до 1,5 Н (на верхній ділянці) і з 4,6 Н до 5,3 Н (біля кореня); аналогічно для пучка з п'яти стебел — з 3,9 Н до 5,1 Н (верхня частина) і з 6,1 Н до 7,5 Н (корінь). Для льону-довгунця зменшення вологості з 56% до 19,4% спричинило збільшення зусилля різання одного стебла з 2,3 Н до 4 Н, а для п'яти стебел — з 3,4 Н до 5,7 Н. Найбільшу різницю в зусиллях виявлено у пшениці озимої: при зниженні вологості з 56,8% до 12,1% зусилля різання одного стебла зростає з 7,5 Н до 11,9 Н (верхня частина) і з 11,6 Н до 17 Н (біля кореня), а для п'яти стебел — з 19,9 Н до 32,7 Н і з 32,1 Н до 47,4 Н відповідно. Зниження вологості БССК призводить до збільшення зусилля різання в середньому на 30–50%.

6. Для досягнення раціональних значень щільності ПР рекомендовано використовувати тиск ущільнення у КПЗО в межах 0,45–0,55 МПа. Цей діапазон дозволяє досягати щільності на рівні 120–130 кг/м³. При таких значеннях забезпечується механічна стабільність рулонів і належна ефективність згоряння. Перед ущільненням біомаса повинна мати вологість у межах 10–15%. Надмірна вологість знижує теплотворну здатність палива та підвищує витрати на сушіння, тоді як надто низька вологість погіршує когезію матеріалу та ускладнює ущільнення. Раціональним об'ємом біомаси для досягнення необхідної щільності без погіршення когезії матеріалу є 0,65–0,75 м³. Склад ПР Л75/П25, який має більшу частку стебел льону, призводить до вищої щільності порівняно з Л50/П50 та Л25/П75 за аналогічних умов.

7. Результати спектрофотометричного аналізу зольних залишків паливних брикетів із БССК показали, що зі зростанням вмісту льону (особливо у зразку Л75/П25) підвищується прозорість витяжок, зменшується кількість нерозчинних компонентів. Зразок Л50/П50 за характеристиками наближається до контрольного зразку(деревина), що підтверджує доцільність саме такого співвідношення для ефективного й екологічно безпечного використання. Водночас зразки з переважанням соломи (Л25/П75) мають підвищену кількість зважених часток і

нижчі спектральні показники. Використані зразки у вигляді паливних брикетів дозволяють зробити висновок про доцільність застосування відповідних співвідношень біомаси стебел сільськогосподарських культур у виробництві паливних рулонів. Формування паливних рулонів із вмістом льону не менше 50% є доцільним як з енергетичної, так і з екологічної точки зору.

8. Найвищу теплопродуктивність (0,420 Гкал/год) продемонстрували рулони зі співвідношенням Л75/П25, проте саме суміш Л50/П50 забезпечила найкращий компроміс між теплоефективністю та мінімальними викидами CO (1210 ppm) і NO_x (62 ppm). Збільшення частки пшениці сприяє зниженню забруднення, однак супроводжується зменшенням енергетичної продуктивності. Враховуючи результати випробувань у котлі KALVIS-400, рекомендованим є використання паливних рулонів із вмістом льону не менше 50%, що забезпечує баланс між ефективністю згоряння, екологічною безпечністю та економічною доцільністю.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ НОВОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

5.1 Оцінка якості паливних матеріалів

Проведені дослідження підтверджують, що оброблення БССК на тверде біопаливо не тільки зменшує екологічну небезпеку, пов'язану з відкритим спалюванням, але також сприяє енергетичній незалежності.

Експериментальні результати, отримані для різних пропорцій БССК ПР, наведені в таблиці 5.1. Слід зазначити, що значення теплової ефективності різняться між варіантами, а викиди мають тенденцію до зменшення зі збільшенням частки стебел льону. Дев'ять ключових параметрів – вміст вологи, тепла ефективність, вміст золи, щільність і рівні викидів (CO_2 , O_2 , CO , SO_2 , NO_x) оцінювали п'ять експертів. Ці бали усереднювали, а потім нормалізували так, щоб їх сума дорівнювала 1. Розрахунки проводили за формулами (4.1), (4.2) і визначали важливість кожного параметра. У таблиці 5.1. наведено підсумкові вагові (W_i) коефіцієнти для кожного параметра за експертною оцінкою S_i .

Еталонне значення для кожного параметра порівнювалося з вимірними значеннями для трьох варіантів ПР: Л75/П25, 2Л50/П50 і 3Л25/П75. Залежно від того, чи кореляція параметра з якістю прямою (що вище, то краще) чи оберненою (чим менше, то краще), нормалізований показник P_i обчислювався за допомогою співвідношення виміряного значення до контрольного значення (3.6) або еталонного значення до виміряного значення (3.7).

Таблиця 5.1 - Експериментальні результати оцінки якості ПР

| 1 | Параметр | Еталонне значення | Вимірне значення | | | W_i | Кореляція |
|---|-----------------------------------|-------------------|------------------|---------|---------|-------|-----------|
| | | | Л75/П25 | Л50/П50 | Л25/П75 | | |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | Вміст вологи, % | 10 | 11 | 10 | 9 | 0,06 | Зворотний |
| 2 | Значення теплового ККД, Гкал /год | 0,388 | 0.420 | 0.394 | 0.367 | 0,20 | Прямий |
| 3 | Зольність, % | 2.7 | 2.3 | 1 . 8 | 1 . 8 | 0,12 | Зворотний |

Продовження таблиці 5.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|-----------------------|-------|--------|--------|--------|------|-----------|
| 4 | Щільність, кг/ м3 | 600 | 140 | 130 | 120 | 0,03 | Прямий |
| Рівні викидів: | | | | | | | |
| 5 | CO ₂ , % | 8 . 2 | 8 . 61 | 7 . 7 | 6 . 8 | 0,12 | Зворотний |
| 6 | O ₂ , % | 9 . 6 | 9 . 0 | 10 . 3 | 11 . 5 | 0,16 | Зворотний |
| 7 | CO, ppm | 2604 | 2131 | 1210 | 950 | 0,14 | Зворотний |
| 8 | SO ₂ , ppm | 47 | 52 | 44 | 38 | 0,03 | Зворотний |
| 9 | NOx, ppm | 75 | 68 | 62 | 57 | 0,16 | Зворотний |

Використовуючи вагові коефіцієнти і нормалізовані показники розраховані за формулами (3.6) і (3.7), комплексний показник якості для кожного варіанта паливного рулону був розрахований згідно з рівнянням (3.3). Остаточні значення показників якості наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Комплексний показник якості для варіантів ПР

| Тип ПР | Пропорційний склад компонентів (%) | Значення комплексного показника якості |
|----------|------------------------------------|--|
| 1Л75/П25 | 75% стебла льону, 25% пшениця/жито | 0,85 |
| 2Л50/П50 | 50% стебла льону, 50% пшениця/жито | 0,98 |
| 3Л25/П75 | 25% стебла льону, 75% пшениця/жито | 1.05 |

У дослідженні було застосовано комплексний показник якості для оцінювання та порівняння різного складу ПР. Значення комплексного показника якості, отримані для випробуваних варіантів - 0,84 для 1Л75/П25, 0,98 для 2Л50/П50 і 1,05 для 3Л25/П75 - підкреслюють загальну ефективність ПР. Склад 3Л25/П75 досяг найвищого комплексного показника якості, що вказує на те, що він забезпечує найкращий баланс між ефективністю згоряння та рівнем викидів.

Система зважування, застосована при обчисленні комплексного показника якості, показала, що навіть помірно зважені параметри, такі як вміст золи, викиди СО та викиди NOx, мають суттєвий вплив на остаточну якість, якщо вони суттєво відхиляються від контрольних значень. Це підкреслює важливість комплексної оптимізації, гарантуючи, що жоден окремих параметр не погіршить загальну продуктивність паливних валків.

Рівень вологи безпосередньо впливає на ефективність згоряння та викиди. Випробувані паливні рулони показали прийнятний вміст вологи, що сприяло стабільному горінню.

Хоча вміст сірки був вищим, ніж у дубових дровах, загальні викиди (СО та NOx) були значно нижчими. Це робить протестовані ПР екологічно чистим варіантом, зменшуючи шкідливі забруднювачі повітря порівняно зі звичайним деревним паливом.

Хоча щільність цих паливних валків нижча порівняно зі звичайним деревним паливом, а вміст сірки трохи вищий, ніж у дубових дровах, загальні викиди менші. Це свідчить про те, що ПР, незважаючи на те, що вони виробляються із БССК, забезпечують збалансовану ефективність спалювання та прийнятні екологічні показники.

З практичної точки зору, впровадження ПР може значно зменшити залежність від деревної біомаси, особливо в сільській місцевості та сільськогосподарських регіонах. Їх економічна ефективність і доступність ще більше підвищують їх привабливість як життєздатного альтернативного палива.

5.2 Розрахунок економічної ефективності використання компактних паливних рулонів

Визначали економічну ефективність від використання ПР із БССК, а саме льону та колосових зернових у твердопаливних котлах KALVIS-400.

Формула для розрахунку економічної ефективності використання ПР порівняно з деревиною враховує економію палива, зниження питомих витрат умовного палива, а також річну економію натурального палива (деревини).

$$E_{ек} = (C_{дер} - C_{пр}) \cdot W_{дер} + S_{ум} \cdot C_{дер} , \quad (5.1)$$

де: $E_{ек}$ - річна економічна ефективність використання ПР (грн/рік);

$C_{дер}$ - вартість 1 тонни деревини (грн/т);

$C_{пр}$ - вартість 1 тонни паливних рулонів (грн/т);

$W_{дер}$ - річна витрата деревини (т/рік);

$S_{ум}$ - річна економія натурального палива (т.у.п./рік),

Вартість 1 тони паливних рулонів включає в себе, вартість сировини, витрати на виробництво, та інші витрати, розраховується за формулою:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{сир}} + C_{\text{вир}} + C_{\text{лог}} + C_{\text{інш}}, \quad (5.2)$$

де: $C_{\text{сир}}$ – вартість сировини (грн/т);

$C_{\text{вир}}$ – витрати на виробництво (грн/т);

$C_{\text{лог}}$ – логістичні витрати (грн/т);

$C_{\text{інш}}$ – інші витрати (грн/т).

Розрахунки проводились з допомогою електронних таблиць Excel. Дані розрахунків занесені в табл. 5.3 та додаток Ж.

Таблиця 5.3 - Таблиця розрахунку економічної ефективності від використання ПР із БССК

| Показник | Значення |
|---|------------|
| Вартість сировини (соломи), т, грн | 1000,0 грн |
| Вартість електроенергії, 1 кВт, грн | 4,32 |
| Заробітня плата з нарахуваннями | 48,0 |
| мін. зар. плата, грн | 8000,0 |
| Нарахування на заробітну плату, відсотки | 22,0 |
| Собівартість 1 т. палива (ПР), грн | 1238,04 |
| Собівартість виробництва 1 т. палива (ПР), грн при наявності сировини | 33,54 |
| Логістичні витрати (перевезення) 100 км, 22 т, грн | 4500 |
| Логістичні витрати (перевезення) 100 км, 1 т, грн | 204,5 |
| Річна економія натурального палива Л75/С25, т.у.п./рік | 2,925 |
| Річна економія натурального палива Л50/С50, т.у.п./рік | 1,570 |
| Річна економія натурального палива Л25/С75, т.у.п./рік | -2,379 |

За даними таблиці 5.3. та обрахувавши їх за формулами 5.1, 5.2, отримали результати які описують прогнозований економічний ефект за годину, річний опалювальний сезон від опалення ПР з різним співвідношенням складових частин, які наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Результати розрахунку прогнозованого економічного ефекту

| Склад ПР | Л75/С25 | Л50/С50 | Л25/С75 |
|--|----------------------------------|-----------|-----------|
| | Сировина (БССК) закуповується | | |
| Економічний ефект за опалювальний сезон, грн | 38817,63 | 37049,63 | 31927,63 |
| Економічний ефект за годину, грн | 8,86 | 8,46 | 7,29 |
| | Сировина (БССК) не закуповується | | |
| Економічний ефект за опалювальний сезон, грн | 603837,63 | 602069,63 | 596947,64 |
| Економічний ефект за годину, грн | 137,86 | 137,46 | 136,2 |

Аналіз прогнозованого економічного ефекту використання паливних рулонів різного складу показує, що наявність витрат на закупівлю сировини суттєво впливає на кінцеву економічну вигоду. Якщо сировина (БССК) закуповується, то економічний ефект за опалювальний сезон коливається від 31 927,63 грн для складу 25% льону та 75% соломи колосових зернових до 38 817,63 грн для складу 75% льону та 25% соломи колосових зернових. Відповідно, економічний ефект за годину роботи котла становить від 7,29 грн/год до 8,86 грн/год, що свідчить про порівняно незначну різницю між різними варіантами паливних рулонів.

Однак у випадку, коли сировина не закуповується, а використовується як побічний продукт аграрного виробництва, економічний ефект суттєво зростає. За опалювальний сезон економія становить від 596 947,64 грн (25% льону та 75% соломи колосових зернових) до 603 837,63 грн (75% льону та 25% соломи колосових зернових), а за годину експлуатації – від 136,2 грн/год до 137,86 грн/год. Це вказує на значну фінансову перевагу при використанні власних ресурсів без додаткових витрат на їх закупівлю.

Найвищий економічний ефект у всіх випадках демонструє склад 75% льону та 25% соломи колосових зернових, що свідчить про його оптимальне співвідношення з точки зору витрат палива та теплотворної здатності. Найнижчий економічний ефект спостерігається для складу 25% льону та 75% соломи колосових зернових, що

може бути наслідком менш ефективного процесу горіння або вищих витрат палива для забезпечення необхідної теплової енергії.

Таким чином, використання паливних рулонів є економічно доцільним порівняно з традиційним паливом. Найбільший економічний ефект досягається при використанні паливних рулонів складу 75% льону та 25% соломи колосових зернових, особливо у випадках, коли сировина не закуповується. Це вказує на можливість значного зниження витрат на опалення за рахунок використання аграрних відходів як безкоштовного ресурсу для виробництва біопалива.

Висновки до розділу 5

1. Отримані значення комплексного показника якості становили 0,84, 0,98 і 1,05 для варіантів Л75/П25, Л50/П50 і Л25/П75 відповідно. Склад Л25/П75 має найвищий комплексний показник якості, що вказує на те, що він забезпечує найкращий баланс між ефективністю згоряння та рівнем викидів.

Хоча щільність ПР нижча порівняно зі звичайним деревним паливом, а вміст сірки трохи вищий, ніж у дубових дровах, загальні викиди менші. Це свідчить про те, що ПР, незважаючи на те, що вони виробляються із БССК, забезпечують збалансовану ефективність спалювання та прийнятні екологічні показники.

2. Аналіз економічної ефективності використання паливних рулонів із різним співвідношенням льону до соломи колосових зернових показує, що найбільший економічний ефект досягається при складі 75% льону та 25% соломи – Л75/П25. Якщо сировина закуповується, економія для складу ПР Л75/П25 становить від 31 927,63 грн до 38 817,63 грн за опалювальний сезон. У випадку, коли сировина не закуповується, економія значно зростає – до 603 837,63 грн за сезон.

Отже паливні рулони з вищим вмістом льону забезпечують кращі економічні показники завдяки оптимальному співвідношенню між теплотворною здатністю та витратою палива. Склад 25% льону та 75% соломи демонструє найменшу ефективність через більші витрати палива для отримання однакової кількості теплової енергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання підвищення якості ущільнення біомаси стебел сільськогосподарських культур у компактні паливні рулони на підставі обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи пресувальної камери змінного об'єму та вдосконалення способу збирання біомаси для підвищення ефективності її оброблення. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена класифікація видів палива із БССК дозволила зробити висновок, що з первинної біомаси раціонально виготовляти ПР, тоді як вторинну – подрібнювати та виготовляти ПБ. Для виробництва ПР та ПБ основними операціями оброблення для біомаси залишків сільськогосподарських культур, є: подрібнення, скручування, ущільнення, пресування. Вона дозволяє систематизувати знання щодо різних видів сировини та підвищити ефективність подальших досліджень.

2. Запропоноване удосконалення процесу збирання БССК, що полягає у забезпеченні можливості збирати необхідну частину БССК за рахунок розміщення за подрібнювальним механізмом підбирача-подрібнювача трьох розгалужень розподільника, два з яких будуть відводити подрібнену масу у поле, третій – буде відводити подрібнену масу в причіп для її збору та подальшого використання. Частина подрібненої БССК, що залишається у полі, дозволяє повертати в ґрунт поживні речовини.

3. Розроблена конструкція вдосконаленої пресувальної камери змінного об'єму, включаючи раціональні параметри пресувальних пружин та положення роликів, що забезпечують ефективне ущільнення біомаси різного складу. У результаті дослідження процесу формування ПР у КПЗО для кожного з трьох етапів формування визначено рівняння моментів сил. Вони дозволили встановити залежності між ущільненням БССК та геометрично-силовими параметрами механізму КПЗО. Досліджено, що при мінімальній щільності ПР $\rho = 80,1 \text{ кг/м}^3$ рекомендовано використовувати жорсткості пружин $C_1 = 2100 \text{ Н/м}$, $C_2 = 3500 \text{ Н/м}$, $C_3 = 2500 \text{ Н/м}$, а сила притискання має становити 1353 Н. Для досягнення

максимальної щільності $\rho = 139,3 \text{ кг/м}^3$ доцільно застосовувати жорсткості $C_1 = 4550 \text{ Н/м}$, $C_2 = 5750 \text{ Н/м}$, $C_3 = 5350 \text{ Н/м}$ при силі 2684 Н .

4. Дослідження фізико-механічних властивостей стебел льону та зернових культур показали, що вилежування біомаси в польових умовах протягом 5 діб за температури $20\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$ сприяє зниженню вологості: у середньому на $8\text{--}13 \%$. У паливних рулонах із суміші льону й соломи вологість стабілізується в межах $8\text{--}11 \%$, а додавання пшеничної соломи зменшує загальну вологість. Зберігання в сухих умовах ($40\text{--}60 \%$ вологості повітря) додатково знижує вологість паливних рулонів на $0,6\text{--}0,9 \%$, що позитивно впливає на якість палива.

5. Після навантаження 250 МПа товщина шару стебел зменшується на $34\text{--}47 \%$, а після релаксації частково відновлюється, залишаючись на $10\text{--}15 \%$ меншою за початкову. Найбільшу пружність мають пшеничні стебла, найменшу — льондовгунець, що дає підстави використовувати пшеницю як наповнювач, а льон — як в'язучий компонент рулону. Зі зниженням вологості зусилля різання зростає в середньому на $30\text{--}50 \%$. Найбільший приріст спостерігається у пшениці до -17 Н для одного стебла біля кореня, що вдвічі більше порівняно з вологою сировиною. Це слід враховувати під час проєктування обладнання для подрібнення.

6. Запропоновано математичну модель ущільнення біомаси в пресувальній камері зі змінним об'ємом, яка дозволяє прогнозувати щільність паливних рулонів в залежності від технологічних параметрів засобу та сировини. Встановлено, що, для раціональних значень щільності необхідний тиск ущільнення у КПЗО в межах $0,45\text{--}0,55 \text{ МПа}$. Цей діапазон дозволяє досягати щільності $120\text{--}130 \text{ кг/м}^3$. При таких значеннях забезпечується механічна стабільність рулонів і необхідна ефективність згоряння. Перед ущільненням біомаса повинна мати вологість у межах $10\text{--}15\%$. Раціональним об'ємом біомаси для досягнення необхідної щільності без погіршення когезії матеріалу є $0,65\text{--}0,75 \text{ м}^3$. Паливні рулони Л75/П25, що мають більшу частку стебел льону, краще ущільнюються ніж Л50/П50 та Л25/П75 за аналогічних умов. Результати експерименту підтвердили теоретичні розрахунки.

7. Результати спектрофотометричного аналізу зольних залишків паливних брикетів із БССК показали, що зі зростанням вмісту льону (особливо у зразку

Л75/П25) підвищується прозорість витяжок, зменшується кількість нерозчинних компонентів. Зразок Л50/П50 за характеристиками наближається до контрольного зразку (деревина), що підтверджує доцільність саме такого співвідношення для ефективного й екологічно безпечного використання. Водночас зразки з переважанням соломи (Л25/П75) мають підвищену кількість зважених часток і нижчі спектральні показники. Використані зразки у вигляді паливних брикетів дозволяють зробити висновок про доцільність застосування відповідних співвідношень біомаси стебел сільськогосподарських культур у виробництві паливних рулонів. Формування паливних рулонів із вмістом льону не менше 50% є доцільним як з енергетичної, так і з екологічної точки зору.

8. Найвищу теплопродуктивність (0,420 Гкал/год) мають рулони зі співвідношенням Л75/П25, проте саме суміш Л50/П50 забезпечила необхідний рівень теплоефективності та мінімальні викиди CO (1210 ppm) і NO_x (62 ppm). Збільшення частки пшениці сприяє зниженню забруднення, однак супроводжується зменшенням енергетичної продуктивності. Враховуючи результати випробувань у котлі KALVIS-400, рекомендованим є використання паливних рулонів із вмістом льону не менше 50%, що забезпечує баланс між ефективністю згоряння, екологічною безпечністю та економічною доцільністю.

9. Визначено комплексний показник якості твердого біопалива та проведено розрахунок прогнозованого економічного ефекту використання паливних рулонів. Отримані значення комплексного показника якості становили 0,84, 0,98 і 1,05 для варіантів Л75/П25, Л50/П50 і Л25/П75 відповідно. Це свідчить про те, що паливні рулони, забезпечують збалансовану ефективність спалювання та прийнятні екологічні показників. Аналіз економічної ефективності використання паливних рулонів із різним співвідношенням льону до соломи колосових зернових показує, що найбільший економічний ефект досягається при складі 75% льону та 25% соломи – Л75/П25. Якщо сировина закуповується, економічний ефект становить від 31 927,63 грн до 38 817,63 грн за опалювальний сезон. У випадку, коли використовуються залишки після збирання врожаю, ефект зростає до 603 837,63 грн за сезон.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

На основі проведених досліджень та отриманих результатів розроблено рекомендації для сільськогосподарських підприємств щодо ефективного використання БССК для виробництва твердого біопалива:

1. Оптимізація збирання та підготовки біомаси

Вологість БССК: Перед використанням у виробництві біопалива необхідно знизити вологість біомаси до 12-15%, що зменшує витрати на сушіння та покращує горючі властивості. Застосовувати роздільний спосіб збирання урожаю, що сприяє рівномірному висиханню. Для прискореного висушування стебел льону та пшениці в полі рекомендується використовувати валкоутворювачі зворушувального типу.

2. Раціональне використання біомаси для виготовлення ПР. Оптимальним є співвідношення льон/пшениця 50/50 або 75/25. Оптимальна щільність ПР становить 110–130 кг/м³. ПР слід зберігати в сухих, вентильованих приміщеннях або під накриттям, щоб запобігти поглинанню вологи.

3. Використання ПР та ПБ у твердопаливних котлах

Експлуатаційні характеристики: ПР та ПБ з БССК мають теплотворну здатність 16–18 МДж/кг, що дозволяє їх використовувати у котлах KALVIS, Buderus, Viessmann, ATMOS та інших. Переваги перед іншими видами палива: використання ПР та ПБ знижує викиди CO₂ та NO_x, а також зменшує кількість зольних залишків у порівнянні з вугіллям. Оптимальні режими горіння: Для ефективного спалювання ПР та ПБ необхідно підтримувати температуру в топці 800–1000°C.

4. Економічна доцільність впровадження технології. Зниження витрат: використання ПР та ПБ дозволяє знизити витрати на закупівлю традиційного палива на 30–40%.

Додатковий прибуток: сільськогосподарські підприємства можуть реалізовувати надлишки біопалива, що дає можливість отримати до 20% додаткового доходу.

Державна підтримка: використання біопалива дає змогу брати участь у програмах екологічних дотацій та отримувати пільгові кредити на розвиток біоенергетики.

6. Екологічна безпека та раціональне використання відходів. Мінімізація викидів: використання ПР та ПБ замість вугілля або газу зменшує викиди парникових газів. Утилізація золи: отриману золу можна використовувати як екологічно безпечне добриво, оскільки вона не містить токсичних домішок.

Зниження залежності від викопного палива: впровадження біопалива дозволяє підприємствам зменшити енергетичну залежність від нестабільних ринків газу та нафти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зінченко О. І., Салатенко В. Н., Білоножко М. А. Рослинництво: Київ : Аграрна освіта, 2001. 951 с.
2. FAOSTAT. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#compare> (дата звернення: 10.09.2023).
3. Yaheliuk S., Fomych M., Rechun O. Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*. 2024. №17(1). P. 134-145. doi: 10.62763/ef/1.2024.134.
4. Meacham J. Ajmera R. Tan V. The top 9 health benefits of flaxseed. URL: <https://www.healthline.com/nutrition/benefits> (дата звернення: 18.04.2024).
5. Ягелюк С. В. Особливості оцінки якості сільськогосподарської продукції на прикладі льону. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: збірник тез міжн. наук.-практ. конф. присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибачка Тимофія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин. 2022. м. Тернопіль. ТНТУ. С. 85-86.
6. Фомич М.І. Властивості насіння льону. Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових і переробних виробництв та ресторанного господарства: збірник тез всеукраїнської наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. м. Луцьк. ЛНТУ, 24 квітня 2024р. С. 71.
7. SOJAM. URL: <https://sojam.ua/etapy-dozrivannia-pshenytsi/> (дата звернення: 12.05.2023).
8. SUPERAGRONOM. URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/zernovi-kulturi-id22805> (дата звернення: 18.06.2024).
9. Види зернових культур. <https://aqua-svit.com.ua/koral/?види%20зернових%20культур> (дата звернення: 20.06.2024).
10. Ягелюк С. В. Формування властивостей льняних матеріалів: монографія. Луцьк: Луцький НТУ, 2016. 128 с.

11. Ягелюк С. В., Дідух В. Ф. Формування якості льняної продукції: монографія. Луцьк: ЛНТУ, 2021. 140 с.
12. Ягелюк С. В. Розвиток наукових основ технологій переробки стебел соломи льону на основі класифікаційних ознак стеблостою: дис. д-ра техн. наук: 05.18.02. м. Херсон, 2019.
13. Ouagne P., Barthod-Malat B., Evon P., Labonne L., Placet V. Fibre extraction from oleaginous flax for technical textile applications: influence of pre-processing parameters on fibre extraction yield, size distribution and mechanical properties. *Procedia Engineering*. 2017. № 200. P. 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.031>
14. Lan R., Eastham S.D., Liu T. et al. Air quality impacts of crop residue burning in India and mitigation alternatives. *Nat Commun*. № 13. С. 6537. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34093-z>
15. Amann M., Gomez-Sanabria A., Klimont Z., Maas R., Winiwarter W. (2017). Measures to address air pollution from agricultural sources. Report for International Institute for Applied Systems Analysis. URL: <https://previous.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/policy/SR11-AGRICULTURE-FINAL.pdf>
16. Gatkal N.R., Nalawade S.M., Sahni Ramesh K. et al. Present trends, sustainable strategies and energy potentials of crop residue management in India: 2024. 10 (21). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39815>
17. Kashytskyi V.P., Sadova O.L., Yanchuk S.L. Intensification of the formation process of sodium sulfate-modified biocomposite materials based on the glutinous matrix. *Funct. Mater*. Vol. 30 (1). 2023. pp. 35-42. <https://doi.org/10.15407/fm30.01.35>
18. Ukrstat. (n.d.). Утворення відходів за класифікацій-ними угрупованнями державного класифіка-тора відходів у 2020 році URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv_zaklass/arch_uv_zaklass_u.htm
(Отримано 01 жовтня 2021)
19. Ягелюк С. В., Фомич М. І., Голій О. В., Хомич А. В. Ідентифікація та класифікація залишків сільськогосподарських культур для подальшого використання. *Сільськогосподарські машини*. № 37, 2021. С. 95-101.

20. Науково - дослідна робота «Рециклінгові технології збирання та первинної переробки біомаси олійних луб'яних культур» на 2021-2023 рр. 0121U109763 Рециклінгові технології збирання та первинної переробки біомаси олійних луб'яних культур (керівник) (Держбюджет)

21. Кузьміна Т. О., Рудакова Г. В та ін. Новітні технології одержання целюлозовмісних матеріалів з льону: монографія. Херсон: ПП Вишемирський, 2015. 456 с.

22. Березовський Ю. В. Технічні рішення процесу переробки лляної сировини. *Наука та інновації*. № 3. 2017. С. 25-37.

23. Yaheliuk S., Didukh V., Busnyuk V., Boyko G., Shubalyi O. Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues. *inmateh-agricultural engineering*. 2020. № 62(3). С. 361-368.

24. Ягелюк С. В., Дідух В. Ф. Концептуальна модель технологій переробки стебел льону. *Сільськогосподарські машини*. № 44. 2020. С. 155-164.

25. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. *Аналітична записка БАУ*. № 7. 2014. С. 12-16.

26. Семірненко С. Л., Семірненко Ю.І. Використання в енергетичних цілях соломи озимої пшениці. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Механізація та автоматизація виробничих процесів*. № 10 (3). 2016. С. 101-104.

27. Блюм Я. Б., Гелетуха І.П., Григорюк І.П. та ін. Новітні технології біоенергоконверсії: монографія. 2010. 326 с

28. Ягелюк С. В., Дідух В. Ф., Артюх Т. Н., Голій О. В. Зусилля різання біомаси олійних луб'яних культур з урахуванням вологості. *Сільськогосподарські машини*. № 46. 2021. С. 124-132.

29. Сай В. А., Бондар Д. О. Результати дослідження процесу сушіння трести льону олійного. *Сільськогосподарські машини*. № 24. 2013. С. 322-326.

30. Julrat S. Trabelsi S. Portable Six-Port Reflectometer for Determining Moisture Content of Biomass Material, *IEEE Sensors Journal*. № 17(15). 2017. P. 4814-4819

31. Nielsen N. P. K., Felby C., Poulsen T., Gardner D. J. Importance of

temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood Fiber Sci.* № 44 (43). 2009. 414–425

32. Chevanan N., Womac A.R., Bitra V.S.P., Igathinathane C., Yang Y.T., et al. Bulk density and compaction behavior of knife mill chopped switchgrass, wheat straw and corn stover. *Bioresource Technol.* № 101. 2010. P. 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.083>

33. Дідух В. Ф., Тарасюк В. В., Оніщук А., Соколовський В. (2016). Визначення властивостей паливних матеріалів сформованих з стебел льону олійного. *Сільськогосподарські машини.* № 35. 2016. С. 16.

34. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф. Електричний метод вимірювання вологості біомаси олійних луб'яних культур. *Товарознавчий вісник.* № 1(15). 2022. С. 298-307. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-26>

35. Цизь І. Є., Мельник О. О., Панечко Р. В. Дослідження деформівних властивостей стебел соломи пшениці. *Сільськогосподарські машини,* № 38. 2017. С. 162-171.

36. Курило В. Л. Механіко-технологічні властивості стебел як передумова до розробки робочих органів сільськогосподарських машин і формування проектних компетентностей агроінженера. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2019. № 1 (104). 2020. С. 20-27.

37. Юхимчук С. М., Толстушко М. М., Юхимчук С. Ф. Кінематика дисково-пасового льонобрального апарата. *Сільськогосподарські машини.* 2022. № 48. С. 81 -87.

38. Юхимчук С. М., Толстушко М. М., Юхимчук С. Ф., Дацюк Л. М. Розробка конструкції дисково-пасового льонобрального апарата. *Наукові нотатки.* № 73. 2022. С. 239-242.

39. Хомич А. В., Дударев І. М. Дослідження роботи струшувача стрічки стебел льону. *Наукові нотатки.* № 34. 2011. С. 297-302.

40. Дударев І. М., Хомич А. В., Герасимик-Чернова Т. П. Теоретичне дослідження процесу брання льону конічно-дисковим льонобральним апаратом. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.* № 1 (12). 2019. С. 64-74.

41. Бобирь С. В., Кузьміна Т. О., Бабіч С. С. Товарознавчі властивості льоносировини для армування геотекстильних полотен. *Товарознавчий вісник*. № 7. 2014. С. 33-40.
42. Толстушко Н. О., Юхимчук С. Ф. Пуць В. С. Дослідження стиску стрічки стебел льонотрести. *Сільськогосподарські машини*. № 38. 2017. С. 145-150.
43. Юхимчук С. М., Юхимчук С.Ф., Толстушко Н.О., Дацюк Л.М. Енергетика брання стебел льону бральним апаратом з прямолінійними поперечними рівчаками. *Наукові нотатки*. № 72. 2021. С. 145-150.
44. Толстушко Н.О., Хайліс Г.А., Шейченко В.О. Визначення основних параметрів робочих органів пресувальної камери рулонного прес-підбирача. *Механізація на електрифікація сільського господарства*. № 97. 2013. 332-339.
45. Berezovsky Y., Kuzmina T., Lialina N., Yedynovych M. , Lobov O. Technical and technological solutions for producing fibre from bast crops. – *INMATEH Agricultural Engineering* – Vol. 60. No. 1 / 2020. – P. 137- 146
46. Lialina N., Zakharchenko P., Bondarenko O. Promising areas for the use of industrial hemp for the manufacture of sheet building materials. *Commodity bulletin journal homepage*. Vol. 17, No. 1. 2024, 83-91.
47. Berezovsky Yu., Kuzmina T., Yedynovych M. , Boyko G. , Lyalina N., Holovenko T. Technical and technological solutions for preparing flax raw materials for processing – *INMATEH Agricultural Engineering* – Vol. 64, No. 2 / 2021. – P. 227-237.
48. Marian Grigore. Biocombustibili solizi: producer si propriet: Manual pentru uzul producatorilor de biocombustibili solizi, Guvernul Rep. Moldova, Progr. *Natiunilor Unite pentru Dezvoltare*. Chisinau: S. n., 2016. P. 172 p.
49. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Gheorghe G. Research on the validation of mathematical models for biomass powder compaction using a ring die pelleting equipment. *INMATEH-Agricultural Engineering*. № 66(1). 2022. P. 211–218 <https://doi.org/10.35633/inmateh-66-21>.
50. Energy content for various biomass C.F.N. URL: <https://cfnielsen.com/faq/what-is-the-calorific-value-of-wood/?e> . (Отримано 01 жовтня 2024)

51. Mehmood Ali, Muhammad Saleem, Zakir Khan, Ian A. Watson (2019) The use of crop residues for biofuel production, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy, Woodhead Publishing. P. 369-395. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00016-3>
52. Jiang Y., Havrysh V., Klymchuk O., Nitsenko V., Balezentis T., Streimikiene D. Utilization of Crop Residue for Power Generation: The Case of Ukraine. Sustainability. 2019. № 11(24). P. 7004. <https://doi.org/10.3390/su11247004>
53. Yaheliuk S. Didukh V., Busnyuk V., Boyko, G., Shubalyi O. (2020) Optimization efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 62 (3). P. 361–368 <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38>
54. Хайліс Г. А. (2004). Механіка рослинних матеріалів Луцьк: РВВ ЛДТУ.
55. Ibrahim Ayman. Physical and mechanical characteristics for some agricultural residues. *Misr J. Ag. Eng.* 2008. Vol. 25. P. 121-147.
56. Goudenhoofft C. Siniscalco, D. Arnould, O. Bourmaud, A. Sire, O. Gorshkova, T. Baley, C. Investigation of the Mechanical Properties of Flax Cell Walls during Plant Development: The Relation between Performance and Cell Wall Structure. *Fibers*. 2018. Vol. 6 (1), P. 6. <https://doi.org/10.3390/fib6010006>
57. Грицюк К. Ю., Борзов В. В., Дударев І. М. Використання відходів переробки льону. *Наукові нотатки*. 2012. Вип. 39. С. 34-38.
58. Головенко Т. М., Бойко Г. А., Іваненко О. О., Шовкомуд О. В. Загальна характеристика показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів. *Молодий вчений*. 2016. Вип. 5. С. 218-222.
59. Головенко Т. М. Розроблення технології переробки стебел трести льону олійного з метою одержання нетканих матеріалів: дис. канд. техн. наук: 05.18.02. Херсон, 2013. 185 с.
60. Головенко, Т. М., Бартків, Л. Г. та ін. Особливості товарознавчої оцінки якості соломи льону олійного. *Товарознавчий вісник*. 2017. Вип. 10. С. 52-63.
61. RUF briquetting systems, n.d. RUF briquetting systems. Our proven briquetting systems change how you process and dispose of your byproducts. URL:

<https://www.ruf-briquetter.com>. (Отримано 01 жовтня 2022).

62. Енергетичні рослини, придатні для поширення в Україні: URL: <https://saf.org.ua/news/1734> (Отримано 36 жовтня 2020).

63. Паливні брикети–сировина і стандарти (Fuel briquettes – raw materials and standards). URL: <https://bio.ukr.bio/ua/articles/1589/> (отримано 28 листопада 2023)

64. C.F. Nielsen A/S. Turn waste into value. URL: <https://cfnielsen.com>. (отримано 28, 2023)

65. Фомич М. І. Технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів. *Сільськогосподарські машини*. 2023. Вип. 49. С. 53-59.

66. Ягелюк С. В., Фомич М. І. Класифікація видів палива з біомаси сільськогосподарських культур. *Сільськогосподарські машини*. 2024. Вип. 50. С. 72-80. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1382>

67. Толстушко Н. О., Юхимчук С. Ф., Кузьменко В. Ф. Аналіз транспортування стрічки льону в пресувальну камеру прес-підбирача. *Сільськогосподарські машини*. 2013. Вип. 24. С. 363-369.

68. Толстушко Н. О. Юхимчук, С. Ф. Визначення щільності шарів стрічки стебел льону в рулоні. *Сільськогосподарські машини*. 2013. Вип. 26. С. 101-106.

69. Налобіна О. О., Герасимчук О. П., Ковальчук Р. В., Ткачук О. Л. Пристрій для збирання стебел коноплі. *Сільськогосподарські машини*. 2016. Вип.35.С. 55-55.

70. CLAAS. URL: <https://www.claas.com/uk-ua> (дата звернення: 13.02.2024).

71. Прес-підбирачі. John deere. URL: <https://www.deere.ua/uk/рулонні-прес-підбирачі/> (дата звернення: 13.02.2024).

72. Особливості рулонних пресів-підбирачів для сіна. Techtronic. URL: <https://techtronic.com.ua/osoblivosti-rulonnix-presiv-pidbirachiv-dlya-sina/> (дата звернення: 9.02.2024).

73. Толстушко Н. О., Хайліс Г. А., Шейченко В. О. Визначення основних параметрів робочих органів пресувальної камери рулонного прес-підбирача. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. Вип.

97(1). С. 332-339.

74. Машина для формування паливних рулонів Патент на КМ № 135725 A01D43/04, A01D45/06 (2006.01) A01F15/07. Опуб. 10.07.2019, бюл.№13.

75. Сумський Н. А. Огляд технічних засобів для заготівлі ущільненої соломи. Студентської наукової конференції, присвяченої міжнародному дню студента. С. 312.

76. Гунько І. В., Холодюк О. В., Кузьменко В. Ф. Обґрунтування параметрів пристрою для доподрібнення зерна при загоспелі кукурудзяного силосу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3 (102). С. 28-36.

77. Комаренко В., Костюнін М. Прес-підбирачі: огляд конструкцій та результати випробувань. *Техніка і технології АПК*. 2014. Вип. (3). С. 13-15.

78. Толстушко Н. О. Обґрунтування основних параметрів робочих органів пресувальної камери рулонного прес-підбирача стрічки льону. *Сільськогосподарські машини*. 2014. Вип. 29-30. С. 96-105.

79. Толстушко Н. О., Хайліс Г. А. Дослідження процесу формування рулону в камері змінного об'єму прес-підбирача. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. Вип. 3. С. 144-148.

80. Єременко О. І., Кузьменко В. Ф. Порівняльний аналіз конструктивно-технологічних показників рулонних прес-підбирачів. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: VII Всеукр. наук.-техн. конф., смт Глеваха Київської області. Київ, Україна, 5-28 грудня 2019 року: матеріали конференції.

81. Прес-підбирачі. Case IH FieldOps. URL: <https://www.caseih.com/emea/ua-ua/продукти/hay-forage>. (дата звернення: 07.01.2024).

82. Сумський Н. А. Огляд технологічних схем збирання соломи зернових культур. студентської наукової конференції, присвяченої міжнародному дню студента. С. 311

83. Налобіна О. О. Пуць В. С. Дослідження процесу підрівнювання стрічки льону під час виконання операції її підбирання. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. *Технічні науки*, 2013. Вип. 3. С. 216-227.

84. Толстушко Н. О. Юхимчук С. Ф. Пуць В. С. Дослідження стиску стрічки стебел льонотрести. Сільськогосподарські машини. 2017. Вип. 38. С. 145-150.
85. Пуць В. С. Ткачук О. Л. Клименко О. Д. Експериментальні дослідження викривлення стебел льону під час поздовжнього стиску. *Сільськогосподарські машини*. 2013. Вип. 24. С. 316-322.
86. Хайлис Г.А. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / Хайлис Г.А., Горбовий А.Ю., Гошко З.О., Ковальов М.М., Налобіна О.О., Юхимчук С.Ф. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 1998. – 268 с
87. Shuliy Machinery. 8–10 t/d Biomass Charcoal Project. URL: <https://charcoalmachines.com> (Отримано 28.03.2023)
88. Семірненко С. Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від деяких факторів. 2011. С. 112-120.
89. Костюнін М., Карманов В., Михайлик В. Дослідження процесу пресування дисперсних матеріалів з метою отримання паливних гранул, брикетів. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2013. Вип. 17. С. 341-345
90. Цизь І. Є., Мельник. О. О., Романюк. Н. М., Бабич М. О. Дослідження процесу ущільнення рослинного матеріалу у конічному каналі. Сільськогосподарські машини. Вип. 35. 2016. С. 123-123.
91. Машини для заготівлі соломи. Ziraatmakinem. URL: https://www.ziraatmakinem.com/trkategorisi307saptoplamalisanmanyapmamakinalari?srsltid=AfmBOorBQxzn3Slh_VLISOg9Mic1gxA92u3frFHHZX11RA66Q62TAAb. (дата звернення: 23.07.2023).
92. Lybid. URL: <https://lybid.com.ua/ua/> (дата звернення: 13.06.2023).
93. Testo 340. Testo. <https://www.testo.com/en/testo-340/p/0632-3340>. (дата звернення: 03.03.2023).
94. Box G.E.P., Behnken D.W., Some New Three Level Designs for the study of Quantitative Vari(1960). ables, Technometrics. Vol. 2 (4). P. 455-475.
95. Freund, R.J., Wilson, W.J., Mohr, D.L. (Гулько, І. В., Холодюк, О. В., & Кузьменко, В. Ф. Обґрунтування параметрів пристрою для доподрібнення зерна при

загоспелі кукурудзяного силосу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3 (102).-С. 28-36. Data and Statistics. Statistical Methods. Academic Press. 2010. С.1–65. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374970-3.00001>.

96. Gageanu, I., Cujbescu, D., Persu, C., Gheorghe, G. Research on the validation of mathematical models for biomass powder compaction using a ring die pelleting equipment. *INMATEH-Agricultural Engineering/* 2022. Vol.66(1), 211–218, <https://doi.org/10.35633/inmateh-66-21>

97. Montgomery C. Douglas. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. 757 p. file:///C:/Users/Sasha/Downloads/Douglas-C.-Montgomery-Design-and-Analysis-of-ExperimentsWiley-2012%20(1).pdf

98. Спектрофотометр UNICO 2800 SpectroQuest. spectrolab. <https://spectrolab.com.ua/ua/p10615612-spektrofotometr-unico-spectroquest.html>. (дата звернення: 03.09.2023).

99. Сатир Л. М., Задорожна Р. П., Непочатенко А. В., Кепко О. І. Аналітичний кваліметричний підхід до оцінки якості продукції як інструмент прийняття ефективних стратегічних рішень. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 17. С. 18–24. DOI: [10.32702/2306-6814.2021.17.18](https://doi.org/10.32702/2306-6814.2021.17.18)

100. Сахно В. П., Біліченко В. В., Іванушко О. М., Визначення вагових коефіцієнтів для побудови математичної моделі коректування періодичності проведення технічного обслуговування і ремонту.: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/article/view/109> (дата звернення 10 жовтня 2023).

101. Розпорядження КМУ № 371-р. (2015). Про схвалення розроблених Міністерством екології та природних ресурсів планів імплементації деяких актів законодавства ЄС. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-%D1%80#Text> (дата звернення 19 жовтня 2023).

102. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> (дата звернення: 12.06.2024).

103. ISO 14001:2015. ISO. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/60857.html>

(дата звернення: 18.07.2024).

104. ДСТУ ISO 14001:2015 Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64015 (дата звернення: 04.10.2024).

105. KRONE Landmaschinen | Über 100 Jahre Qualität | Entdecken. KRONE Landmaschinen | Über 100 Jahre Qualität | Entdecken. URL: <https://www.krone-agriculture.com/de/> (date of access: 19.11.2024).

106. AGCO GmbH, Fendt-Marketing. Fendt Deutschland | Ein führender Hersteller für Landmaschinen. URL: <https://www.fendt.com/ua/> (date of access: 14.05.2025).

107. ТУ У 01.1-2303511525-001:2025 Солома льону олійного. Технічні умови: – [Чинний від 2025-04-15]. – К.: ДП із Київоблстандартметрологія Мінекономрозвитку України, 2025. – 35 с. (Технічні умови України)

108. ТУ У 01.1-3161317547:2025 Треста льону олійного. Технічні умови: – [Чинний від 2025-04-15]. – Біла Церква: ДП "Київоблстандартметрологія" Мінекономрозвитку України, 2025. – 41 с. (Технічні умови України)

109. ТУ У 01.1-3161317547-002:2025 Волокно льону олійного. Технічні умови: – [Чинний від 2025-04-15]. – Біла Церква: ДП "Київоблстандартметрологія" Мінекономрозвитку України, 2025. – 64 с. (Технічні умови України)

110. Yaheliuk S., Didukh V., Fomich M., Yaheliuk O., Kuzmina T., Boiko G. Optimization of technological parameters for fuel roll production using agricultural crop stem biomass. Inmatch - Agricultural Engineering. 2025. №75. 243-252. <https://doi.org/10.35633/inmatch-75-21>

ДОДАТКИ

Додаток А



а



б

Рис. А.1. Прес-підбирачі Claas: а – рулонний; б – тюковий [70]

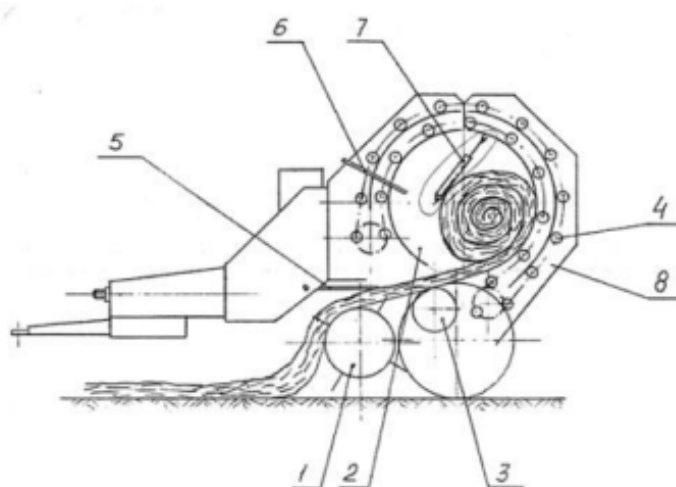


Рис. А.2. Схема роботи прес-підбирача ПРН-145: 1 – підбирач; 2 – камера пресування; 3 – барабан пресування; 4 – механізм пресувальний; 5 – гребінка; 6 – сигналізатор ступеня ущільнення; 7 – гідроциліндр; 8 – камера задня



Рис. А.3. Самонавантажувальний причіп [102]

Додаток Б

Таблиця Б.1. Характеристики тюкових прес-підбирачів [70, 103]

| Бренд та марка | Робоча ширина (ширина захвату), см | Вимоги до трактора кВт/к.с. | Розміри тюка, см | | | Форма пресування |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------|---------------------|------------------|
| | | | ширина | Висота | максимальна довжина | |
| Fendt 990 SP Gen3 | 226 | 112/150 | 80 | 90 | 274 | прямокутна |
| Fendt 1270 SP Gen3 | 226 | 120/160 | 120 | 70 | 274 | прямокутна |
| Fendt 1290 TP Gen3 | 226 | 127/170 | 120 | 90 | 274 | прямокутна |
| Fendt 12130 SP Gen3 | 226 | 150/200 | 120 | 130 | 274 | прямокутна |
| Claas 5300 RC ROTO CUT | 235 | 150/200 | 120 | 90 | 300 | прямокутна |
| Claas QUADRANT 5200 EVOLUTION | 235 | 210/286 | 120 | 70 | 300 | прямокутна |

Таблиця Б.2. Характеристики рулонних прес-підбирачів [70, 103]

| Бренд та марка | Робоча ширина (ширина захвату), см | Вимоги до трактора кВт/к.с. | Розміри пресувальної камери, см | | Об'єм пресувальної камери (м ³) | Форма пресування |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------|---|------------------|
| | | | діаметр | ширина | | |
| Fendt Rotana 130 F | 226 | 45/60 | 125 | 123 | 1.5 | рулон |
| Fendt Rotana 130 F Combi | 226 | 60/80 | 125 | 123 | 1.5 | рулон |
| Claas VARIANT 585 RC PRO | 210/235 | 75/102 | 90-180 | 120 | - | рулон |
| Claas VARIANT 560 RF/RC | 210/235 | 75/102 | 90-160 | 120 | - | рулон |
| Claas VARIANT 450 | 210 | 105/140 | 90-255 | 120 | - | рулон |
| Claas ROLLANT 520 RC | 210 | 80/110 | 125 | 120 | - | рулон |

Додаток В



Рис. В.1. Прес для виготовлення брикетів типу RUF [47]



Рис. В.2. Прес BP2510 [48]

Додаток Г

Таблиця Г.1. Таблиця значень кутів для першого етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|----|----------------|--|--------------|
| 1 | φ_1 | Кут між важелем O_5O_4 і вертикаллю | $36,8^\circ$ |
| 2 | φ_2 | Кут, який визначає нахил сили F_3 до важеля O_4O_5 , що виникає у пружині ролика 4 у точці O_4 і діє на ПР. | $35,2^\circ$ |
| 3 | φ_3 | Кут між нормаллю до поверхні ролика O_4 (лінією дії нормальної сили N_M і важеля O_4O_5) яка виникає в точці контакту ролика з рулоном. | $50,2^\circ$ |
| 4 | φ_4 | Кут, який описує нахил сили F_2 до важеля O_1O_5 , яка передається від пружини ролика 1 у точці O_1 до рулону. | 79° |
| 5 | φ_5 | Кут який показує нахил сили тяжіння G_1 , яка діє на важіль у точці O_5 до важеля O_1O_5 осі. | $87,8^\circ$ |
| 6 | φ_6 | Кут який утворюється між лінією важеля O_1O_5 і нормаллю до сили N_{M1} . | $71,6^\circ$ |
| 7 | φ_7 | Кут який утворюється між нормаллю N_M і перпендикуляру O_2O_3 . | $62,2^\circ$ |
| 8 | φ_8 | Кут який утворюється між силою ваги ролика (вертикаллю) і перпендикуляру O_2O_3 . | $29,0^\circ$ |
| 9 | φ_9 | Кут який утворюється між напрямком сили F_1 і перпендикуляром важеля O_2O_3 . | $27,0^\circ$ |
| 10 | φ_{10} | Кут який утворюється між нормальною силою N_c і перпендикуляром важеля O_2O_3 . | $59,4^\circ$ |
| 11 | φ_{11} | Кут який утворюється між нормаллю N_{M1} , і перпендикуляром O_2O_3 . | $38,6^\circ$ |
| 12 | φ_{12} | Кут який утворюється між лінією сили N_B і вертикаллю. | $30,4^\circ$ |
| 13 | φ_{13} | Кут який визначає нахил нормальної сили N_A , яка діє у точці А між роликом 1 у точці O_1 і рулоном. | $30,4^\circ$ |
| 14 | φ_{14} | Кут який утворюється між лінією сили N_C і вертикаллю. | $88,3^\circ$ |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

•

Таблиця Г.2. Таблиця значень плечей сил і довжин елементів КПЗО для першого етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|---|------------|---|--------------------|
| 1 | O_1K_3 | Плеце сили тяжіння G_1 , прикладеної до важеля, яке проєктується на горизонтальну вісь відносно точки опори O_1 . | 0,374 м |
| 2 | O_1K_4 | Плеце сили тяжіння ролика 3 | 0,458 м |
| 3 | O_1K_6 | Плеце сили N_M | 0,157 м |
| 4 | O_1C_2 | Відстань від центру ролика 1 до центру важеля O_1O_2 | 0,147 м |
| 5 | O_1O_5 | Відстань між центрами роликів O_1 і O_5 | $0,5 \cdot O_1C_2$ |
| 6 | O_4C_3 | Залишкова довжина після дії сили для пружини ролика 4 у точці O_4 . | 0,215 м |
| 7 | K_1C_1 | Довжина пружини важеля O_2O_3 | 0,551 м |
| 8 | K_2C_2 | Довжина пружини важеля O_1O_5 | 0,452 м |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

Таблиця Г.3. Таблиця значень кутів для другого етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|----|----------------|--|---------------|
| 1 | φ | Кут між горизонталлю і важелем O_4O_5 | $39,5^\circ$ |
| 2 | φ_1 | Кут між перпендикуляром до O_4O_5 і силою N_M | $39,22^\circ$ |
| 2 | φ_2 | Кут між перпендикуляром до O_4O_5 і силою F_3 | $59,79^\circ$ |
| 3 | φ_3 | Кут між горизонталлю і важелем O_2O_3 | $9,11^\circ$ |
| 4 | φ_4 | Кут між перпендикуляром до O_2O_3 та силою N_c | $49,44^\circ$ |
| 5 | φ_5 | Кут між важелем O_3O_4 та вертикаллю | $87,84^\circ$ |
| 6 | φ_6 | Кут між горизонталлю та важелем O_1O_5 | $9,06^\circ$ |
| 7 | φ_7 | Кут між перпендикуляром до O_1O_5 та силою F_2 | $26,12^\circ$ |
| 8 | φ_8 | Кут між перпендикуляром до O_1O_5 та силою N_E | $49,65^\circ$ |
| 9 | φ_{10} | Кут між важелями O_1O_5 і O_5O_4 | $30,44^\circ$ |
| 10 | φ_{11} | Кут між вертикаллю та силами N_A і N_B | $40,37^\circ$ |
| 11 | φ_{12} | Кут між вертикаллю та силою N_c | $58,55^\circ$ |
| 12 | φ_{13} | Кут між вертикаллю та силою N_E | $58,71^\circ$ |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

Таблиця Г.4. Таблиця значень плечей сил і довжин елементів КПЗО для другого етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|---|------------|---------------------------------|----------|
| 1 | K_1C_1 | Довжина пружини важеля O_2O_3 | 0,507 м |
| 2 | O_1K_3 | Плече сили N_M | 0,291 м |
| 3 | K_2C_2 | Довжина пружини важеля O_1O_5 | 0,494 м |
| 4 | O_1O_5 | Довжина важеля O_1O_5 | 0,294 м |
| 5 | O_4C_3 | Довжина пружини ролика 4 | 0,148 м |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

Таблиця Г.5. Таблиця значень кутів для третього етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|---|-------------|---|----------|
| 1 | φ | Кут між важелем O_2O_3 і силою N_c | 53,98° |
| 2 | φ_1 | Кут між важелем $O_2O_3(O_1O_5)$ і горизонталлю | 17,96° |
| 3 | φ_2 | Кут між відрізком OO_3 і вертикаллю | 18,06° |
| 4 | φ_3 | Кут між силою F_3 і горизонталлю | 6,54° |
| 5 | φ_4 | Кут між важелем O_5O_4 і горизонталлю | 54,08° |
| 6 | φ_5 | Кут між важелем O_1O_5 і вертикаллю | 72,04° |
| 7 | φ_6 | Кут між силою F_3 і важелем O_5O_4 | 29,38° |
| 7 | φ_7 | Кут між відрізком OO_4 і горизонталлю | 29,38° |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

Таблиця Г.6. Таблиця значень плечей сил і довжин елементів КПЗО для третього етапу формування*

| | Позначення | Опис | Значення |
|---|--|---|--------------------|
| 1 | RO | Радіус ПР перед вивантаженням | 0,15 м |
| 2 | R | Радіус роликів | 0,1 м |
| 3 | $O_2O_3 = O_1O_2 =$ $O_1O_5 = O_4O_5$ | Довжини важелів | 0,294 м |
| 4 | O_5C_3 | Відстань між центром ролика 5 і точкою закріплення пружини ролика 4 | 0,147 м |
| 5 | $O_2O = O_1O =$ $O_3O = O_4O =$ $O_5O = R + R_0$ | Відстані між центрами роликів та центром валика. | 0,25 м |
| 6 | O_2C_1 | Половина довжини важеля O_2O_3 | $0,5 \cdot O_2O_3$ |

*Значення отриманні шляхом вимірювання креслень в кожному з етапів формування ПР (положень механізму).

Додаток Д

Технічні характеристики спектрофотометра UNICO модель 2800

| Найменування характеристики | 2800 |
|---|--------------------------------|
| 1. Спектральний діапазон, нм | 190 – 1100 |
| 2. Діапазон вимірювань спектральних коефіцієнтів направлено пропускання, % | 1 – 99 |
| 3. Діапазон показань спектральних коефіцієнтів направлено пропускання, % | 0 – 200 |
| 4. Діапазон вимірювань оптичної щільності, Б | 0,01 – 3,0 |
| 5. Діапазон показань оптичної щільності, Б | –0,3 – 3,0 |
| 6. Межі абсолютної похибки спектрофотометрів при вимірюванні спектральних коефіцієнтів направлено пропускання, % від 400 до 800 нм 190 до 400 нм і від 800 до 1100 нм | ± 0,5 ± 1,0 |
| 7. Межі абсолютної похибки установки довжин хвиль, нм | ± 1,0 |
| 8. Виділяється спектральний інтервал, нм | 4,0 |
| 9. Рівень розсіяного світла, %, не більше | 0,15 |
| 10. Дрейф показань, Б / ч, не більше | ± 0,002 |
| 11. Відхилення нульової лінії від середнього значення (в діапазоні від 300 до 800 нм), Б, не більше | ± 0,004 |
| 12. Габаритні розміри (Д * Ш * В), мм | 650 * 540 * 390 |
| 13. Маса, кг | 24 |
| 14. Середній термін служби, років | 8 |
| 15. Потужність, В · А | 195 |
| 16. Напруга живлення частотою (50 ± 1) Гц, В | 220 (+15 –20)% |
| 17. Умови експлуатації: –діапазон температур навколишнього повітря, 0С –діапазон відносної вологості навколишнього повітря (при 25 0С), % – діапазон атмосферного тиску, кПа | 15 – 30 20 – 80 84 – 106 |

Додаток Е

Експлуатаційні та технологічні характеристики твердопаливного опалювального котла KALVIS 400

| Модель | | KALVIS-400 |
|--|---------|---|
| Тип котла | | Водогрійний, ручна подача, барабанний, жаротрубний, 3-ьохходовий |
| Номінальна потужність, кВт | | 400 |
| Діапазон регулювання потужності, кВт | | 140...440 |
| Площа обігріву, м ² | | 3600...4300 |
| Використовуване паливо | | Дрова, дерев'яні відходи, тирсові та торф'яні брикети, кам'яне вугілля та ін. |
| ККД, % | | 87 |
| Діапазон регулювання температури води, °С | | 70...105 |
| Максимальний тиск води в котлі, МПа (кгс/см ²) | | 0,4 (4), спец. замовлення 0,6 (6) |
| Гідрравлічний опір, мбар | | 29 |
| Розмір топки, мм | висота | 900 |
| | ширина | 900 |
| | довжина | 1500 |
| Об'єм одноразового завантаження пального, дм ³ | | 1210 |
| Розміри отвору завантаження, мм | | 600x620 |
| Тривалість горіння завантаження, год | | 2...7 |
| Об'єм води в котлі, м ³ | | 1,12 |
| Розміри під'єднання, мм | труби | Ø89x4 (3,5 ") |
| | фланці | Ø185 |
| | димиход | Ø325 |
| Габарити, мм | висота | 2580 |
| | ширина | 1400 |
| | довжина | 2400 |
| Вага, кг | | 2900 |

Додаток Ж

ДКП «Луцьктепло»
виробничо-налагоджувальна
лабораторія
43021, м. Луцьк
вул. Г. Артемовського, 20,
lutskteplo@kp.lutskrada.gov.ua

Довідка

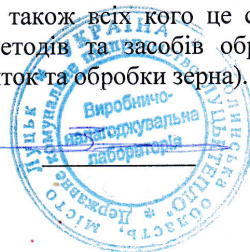
Щодо результатів визначення кількісного та якісного складу викидів від спалювання палива з біомаси стебел сільськогосподарських культур у опалювальному водонагрівальному котлі KALVIS – 400 у паливній спорткомплексу Луцького національного технічного університету (вул. Львівська, 79). Дослідження проводилось за нормативною методикою та у відповідності до інструкції по монтажу й обслуговуванню опалювального водонагрівального котла KALVIS – 400, з допомогою портативного газоаналізатора Testo-340. Результати дослідження представлені нижче.

Розрахунок ефективності використання котельні Котел KALVIS-400

| № П/П | Найменування параметрів | Одиниця вимірювання | деревина | 75%/25% льон/солома | 50/50% льон/солома | 25%/75% льон/солома |
|-------|--|-----------------------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | Теплопродуктивність котла | Гкал/год | 0,388 | 0,420 | 0,394 | 0,367 |
| 2 | Температура відхідних газів | °С | 129 | 129 | 128 | 128 |
| 3 | Вміст у вихідних газах: | | | | | |
| | CO ₂ | % | 8,2 | 8,61 | 7,7 | 6,8 |
| | O ₂ | % | 9,6 | 9,0 | 10,3 | 11,5 |
| | CO | ppm | 2604 | 2131 | 1210 | 950 |
| | SO ₂ | ppm | 47 | 52 | 44 | 38 |
| | NO _x | ppm | 75 | 68 | 62 | 57 |
| 4 | Коефіцієнт надлишку повітря | | 1,57 | 1,52 | 1,66 | 1,83 |
| 5 | Втрати тепла: | | | | | |
| | - з відхідними газами | % | 9,05 | 8,72 | 7,73 | 10,75 |
| | - з хімічним недопалом | % | 1,874 | 1,471 | 0,942 | 0,839 |
| | - з механічним недопалом | % | 0,82 | 0,76 | 0,85 | 0,98 |
| | - з фізичною теплою шлаків | % | 0,85 | 0,62 | 0,99 | 1,40 |
| | - в навколишнє середовище | % | 8,33 | 8,33 | 8,33 | 8,33 |
| 6 | ККД котла "брутто" | % | 80,74 | 81,47 | 81,16 | 80,07 |
| 7 | Витрата палива | кг/год | 129 | 129 | 128 | 128 |
| 8 | Питома витрата умовного палива на 1Гкал виробленого тепла: | кг.ум.пал/Гкал. | 176,92 | 175,33 | 176,01 | 178,40 |
| 9 | Економія питомої витрати умовного палива | кг.ум.пал/Гкал. | | 1,59 | 0,91 | -1,48 |
| 10 | Кількість годин роботи котла | год. | 4380 | 4380 | 4380 | 4380 |
| 11 | Сер.річний коефіцієнт завантаження котла | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | Річна економія умовного палива | т.у.п./рік | | 2,925 | 1,570 | -2,379 |
| 13 | Концентрація NO _x приведена до нормальних умов та O ₂ = 6% | мг/м ³ | 369,45 | 321,20 | 330,38 | 344,53 |
| 14 | Концентрація CO, приведена до нормальних умов та O ₂ = 6% | мг/м ³ | 7847,58 | 6158,12 | 3944,65 | 3512,97 |
| 15 | Часовий викид NO _x | кг/год | 0,062 | 0,058 | 0,056 | 0,055 |
| 16 | Часовий викид CO | кг/год | 1,311 | 1,106 | 0,667 | 0,561 |
| 17 | Зниження часового викиду NO _x | кг/год | | 0,0036 | 0,0035 | 0,0034 |
| 18 | Зниження часового викиду CO | кг/год | | 1,450 | 0,874 | 0,735 |
| 19 | Зниження валового викиду NO _x | кг/рік | | 15,75 | 15,21 | 14,94 |
| 20 | Зниження валового викиду CO | кг/рік | | 6350,85 | 3830,03 | 3221,36 |
| 21 | Річна економія натурального палива | т.м ³ /рік | | 0,977 | 0,526 | -0,808 |

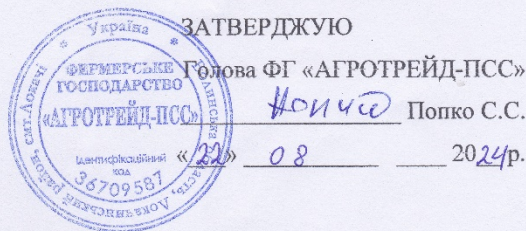
Довідка призначена для кафедр аграрної інженерії імені професора Г. А. Хайліса, товарознавства та експертизи у митній справі, а також всіх кого це стосується. Результати можуть бути використані для удосконалення методів та засобів обробки біомаси стебел сільськогосподарських культур (післяжнивних решток та обробки зерна).

Начальник виробничо-налагоджувальної лабораторії



Олександр ЗЕЙЛИК

Додаток И



Акт

лабораторно-виробничих випробувань пресувальної камери змінного об'єму

Акт склала комісія в складі: голова - ФГ «АГРОТРЕЙД-ПСС» Попко С.С., члени комісії – д.т.н., професор кафедри аграрної інженерії Дідух В.Ф., д.т.н., професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі ЛНТУ Ягелюк С.В., інженер Терещук В.А., здобувач наукового ступеня Фомич М.І.

При проведенні випробувань пресувальна камера змінного об'єму забезпечила виготовлення компактних паливних рулонів з біомаси стебел сільськогосподарських культур із різним вмістом стебел льону та соломи пшениці, а саме: Л175/С25, Л150/С50, Л25/С75.

В результаті випробувань встановлено, що камера змінного об'єму яка складається з п'яти роликової камери пресування змінного об'єму, підпружинених рамок забезпечує формування паливних рулонів заданих розмірів та щільності без обв'язування шпигатом.

Дана конструкція пресувальної камери змінного об'єму є роботоздатною. Комісія рекомендує впровадити пресувальну камеру змінного об'єму для виробництва компактних паливних рулонів з біомаси стебел сільськогосподарських культур з метою поліпшення екологічної, економічної та соціальної ситуації для сільських господарств та теплотехнічних підприємств України, адже запропонована пресувальна камера змінного об'єму дозволить вирішити питання екологічної утилізації біомаси стебел сільськогосподарських культур та запропонувати енергоефективне та екологічне паливо.

Голова комісії:

Попко С.С. Попко

Члени комісії:

Дідух В.Ф. Дідух

Ягелюк С.В. Ягелюк

Терещук В.А. Терещук

Фомич М.І. Фомич

Додаток К

Затверджую

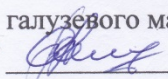
Проректор з науково педагогічної роботи
та досліджень Луцького національного
технічного університету
Лютак О. М.
« 28 » 12 2024р.

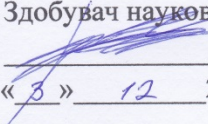
АКТ

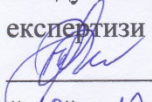
про впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи
в навчальний процес

Результати науково-дослідної роботи на тему «Удосконалення засобу
оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур» виконаних у
Луцькому національному технічному університеті використані в навчальному
процесі на кафедрах галузевого машинобудування (протокол № 5 від
14.12. 2024р), товарознавства та експертизи у митній справі (протокол
№ 4 від 10.12 2024р).

Зазначені результати включені в предмети «Проектування машин та
обладнання галузі», «Конструювання машин», «Дослідження процесів і
конструкцій технологічних машин», «Експертиза якості та безпеки
харчових продуктів», «Нормативна база для досліджень у галузевому
машинобудуванні»

Завідувач кафедри
галузевого машинобудування
 / В.С. Пуць
« 14 » 12 2024р.

Здобувач наукового ступеня
 / М.І. Фомич
« 3 » 12 2024р.

Завідувач кафедри товарознавства та
експертизи у митній справі
 / О.В. Пахолюк
« 10 » 12 2024р.

Додаток Л

Затверджую

Директор

Володимир-Волинського ЦПО

Мозоль Ю.В.

2024р.



АКТ

про впровадження (використання) результатів науково-дослідної дисертаційної роботи
в навчальний процес

Результати науково-дослідної дисертаційної роботи на тему «Удосконалення засобу оброблення біомаси стебел сільськогосподарських культур» виконаних у Луцькому національному технічному університеті використані в навчальному процесі у Володимир-Волинському ЦПО на підставі рішення засідання методичної комісії педагогічних працівників професій агропромислового комплексу (протокол № 3 від 24.10 2024р.) та методичної комісії загальноосвітніх дисциплін (протокол № 3 від 24.10 2024р.).

Зазначені результати включені в предмети «Будова, технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки», «Біологія та екологія», «Основи енергоефективності», «Обробка та зберігання сільськогосподарської продукції», «Основи землеробства», «Основи галузевої економіки та підприємництва», «Агротехнології».

Голова методичної комісії
педагогічних працівників професій
агропромислового комплексу
[Signature] / П.В. Прокуда
«24» 10 2024р.

Здобувач наукового ступеня

[Signature] / М.І. Фомич
«23» 10 2024р.

Голова методичної комісії
загальноосвітніх дисциплін
[Signature] / О.В. Садуро
«24» 10 2024р.