

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності**

Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Функціональні біокомпозитні матеріали для
застосування у дизайні меблів / Functional
biocomposite materials for use in furniture design**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМс-31
Нестерук Дмитро Петрович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Фещук Юрій Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбірович Н.Ю.

“ ____ ” _____ 20 26 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Нестеруку Дмитру Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Функціональні біокомпозитні матеріали для застосування у дизайні меблів / Functional biocomposite materials for use in furniture design*

керівник роботи *Фещук Юрій Петрович, к.т.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *31.12.2025* року № *540/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« *23* » *травня* *2026* р.

3. Вихідні дані до роботи *функціональні біокомпозитні матеріали.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; розділ 1 сучасний стан та перспективи створення безформальдегідних композитів; розділ 2 об'єкти, матеріали та методи дослідження; розділ 3 результати експериментальних досліджень та їх обговорення; розділ 4 техніко-економічне обґрунтування та екологічний моніторинг; висновки та практичні рекомендації; список використаних джерел; додатки.*

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

1. Завдання роботи - 1л. ф.А4.

2. Об'єкт та предмет дослідження - 1л. ф.А4.

3. Вихідна рослинна сировина та її хімічний склад - 1л. ф.А4.

4. Технологічний процес та методи виготовлення - 1л. ф.А4.

5. Експериментальні дослідження та фізико-механічні властивості - 1л. ф.А4.

6. Економічне обґрунтування та собівартість - 1 л. ф.А4.

7. Естетичні характеристики та інтеграція в дизайні меблів - 1л. ф.А4.

8. Висновки - 1л. ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ.</i>	<i>05.05.2026</i>	
	<i>Розділ 1 Технічне обґрунтування</i>		
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Дослідна частина.</i>	<i>12.05.2026</i>	
	<i>Розділ 3 Технологічна частина.</i>		
<i>3</i>	<i>Розділ 4 Конструкторська частина</i>	<i>19.05.2026</i>	
	<i>Висновки та практичні рекомендації.</i>		
	<i>Список використаних джерел.</i>		

Здобувач вищої освіти _____ *Нестерук Д.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Фещук Ю.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Нестерук Дмитро Петрович. Функціональні біокомпозитні матеріали для застосування у дизайні меблів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

В даній роботі запропоновано вдосконалення технологічного процесу отримання екологічно безпечних конструкційних безформальдегідних біокомпозитів для індустрії меблів.

Проведено комплексні технологічні розрахунки балансу сировини та кукурудзяного крохмалю. Визначено оптимальні режими механохімічної активації наповнювача, а також розраховано час нагріву, питомий тиск і тривалість витримки зразків при гарячому пресуванні.

Підібрано необхідне технологічне обладнання для реалізації технологічного процесу.

Спроектовано і проведено необхідні розрахунки допоміжного оснащення: різальний млин Retsch SM 300 і гідравлічний прес Carver Model 3851-C.

Магістерська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки. Пояснювальна записка містить 48 сторінку формату А4, 3 таблиць та 8 літературних джерела та 6 додатків. Графічна частина містить 8 листів формату А4.

Ключові слова: конопляна костриця, кукурудзяний крохмаль, соняшниковий жмих, механохімічна активація, гаряче пресування, безформальдегідний адгезив, собівартість, біодеградація.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.	Нестерук				Функціональні біокомпозитні матеріали для застосування у дизайні меблів				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.	Фещук										3	48
Реценз.									ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМС-31			
Н. Контр.	Мисковець											
Затв.	Імбирович											

ANNOTATION

Nesteruk Dmytro Petrovych. Functional biocomposite materials for use in furniture design. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University.
Lutsk, 2026.

This paper proposes an improvement in the technological process for obtaining environmentally safe structural formaldehyde-free biocomposites for the furniture industry.

Comprehensive technological calculations of the balance of raw materials and corn starch were carried out. Optimal modes of mechanochemical activation of the filler were determined, and the heating time, specific pressure and duration of sample holding during hot pressing were also calculated.

The necessary technological equipment was selected for the implementation of the technological process.

The necessary calculations for auxiliary equipment were designed and carried out: Retsch SM 300 cutting mill and Carver Model 3851-C hydraulic press.

The master's thesis consists of a graphic part and an explanatory note. The explanatory note contains 48 pages of A4 format, 3 tables and 8 literary sources and 6 appendices. The graphic part contains 8 sheets of A4 format.

Keywords: hemp fescue, corn starch, sunflower cake, mechanochemical activation, hot pressing, formaldehyde-free adhesive, cost, biodegradation.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ БЕЗФОРМАЛЬДЕГІДНИХ БІОКОМПОЗИТІВ	8
1.1. Аналіз негативного впливу фенолформальдегідних смол у меблевій промисловості.....	8
1.2. Класифікація та властивості вторинної рослинної сировини для виробництва плит.	11
1.3. Природні полімери як альтернативні адгезиви (крохмаль, лігнін, біо- наповнювачі).....	14
1.4. Світовий досвід застосування «зелених» композитів у дизайні меблів.....	18
1.5. Мета і задачі дипломної роботи	22
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
2.1. Характеристика вихідної сировини: конопляна костриця (або лушпиння) та кукурудзяний крохмаль.	23
2.2. Методика підготовки рослинного наповнювача (подрібнення та фракціонування).	24
2.3. Рецептатура та технологія приготування безформальдегідного крохмального клею.	26
2.4. Опис лабораторної установки для пресування зразків та методика проведення експерименту. (Використання доступного гідравлічного преса)....	28
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	31
3.1. Дослідження впливу частки адгезиву на міцність біокомпозиту при згині.	31
3.2. Визначення водопоглинання та розбухання отриманих зразків.	33
3.3. Аналіз термічної стійкості та вогнестійкості композитів із гібридним сполучним.	35

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Порівняння характеристик отриманого матеріалу з традиційними плитами ДСП та МДФ.....	37
РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ	39
4.1. Розрахунок собівартості виробництва меблевої плити з «недооціненої» сировини.....	39
4.2. Оцінка екологічного ефекту від заміни токсичних смол на природні компоненти.	41
4.3. Перспективи впровадження розробленого матеріалу в серійне виробництво меблів.....	43
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48
ДОДАТКИ	

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сьогодні ми живемо в час, коли фраза «екологічно чистий» перестала бути просто маркетинговим ходом. Це стало новим стандартом життя. Світ навколо нас стрімко змінюється: люди дедалі прискіпливіше обирають те, що вони їдять, у що одягаються і, що найважливіше, у якому середовищі вони живуть.

Особливо гостро це відчувається серед покоління зумерів. Для молоді сьогодні критично важливо, щоб речі навколо них були не просто стильними, а «здоровими». Вони не хочуть купувати меблі, які роками виділяють токсичні пари формальдегіду прямо у них у спальні. І це не просто каприз – це базове право на безпеку власного здоров'я.

Проте тут виникає серйозний виклик: як зробити меблі доступними, міцними, але при цьому повністю позбутися шкідливих смол? Саме цій проблемі й присвячена моя дипломна робота.

Ми звикли, що деревообробна промисловість міцно «сидить» на фенолформальдегідних сполучних, бо це дешево і зручно. Але я пропоную піти іншим шляхом. Ця дипломна робота доводить, що ми можемо створювати круті, функціональні біокомпозити, використовуючи те, що буквально лежить під ногами – вторинну рослинну сировину. Те, що раніше вважалося відходами агросектору, у поєднанні з безформальдегідними процесами стає основою для меблів майбутнього.

Суть цієї роботи – не просто описати ще один теоретичний матеріал, а показати реальний механізм: як за допомогою «зеленої хімії» та недооцінених природних ресурсів створити продукт, який задовольнить запит найвибагливішого сучасного споживача.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ
БЕЗФОРМАЛЬДЕГІДНИХ БІОКОМПОЗИТІВ

1.1. Аналіз негативного впливу фенолформальдегідних смол у меблевій промисловості.

На сьогоднішній день більшість корпусних меблів виготовляється з деревно-стружкових плит ДСП або МДФ, де основним сполучним компонентом є фенолформальдегідні смоли. Їх використовують уже десятки років, бо це найдешевший спосіб склеїти подрібнену деревину і отримати міцну панель. Проте за такою технологічною зручністю стоїть серйозна проблема, яку зараз активно обговорюють у науковому середовищі – це токсичність цих смол для людини та довкілля.

Перша і найголовніша проблема полягає у хімічній нестабільності таких плит. Процес полімеризації смоли в готових меблях ніколи не буває завершеним на 100%. Це означає, що протягом усього терміну служби шафа чи ліжка постійно виділяють у повітря вільний формальдегід. Формальдегід офіційно визнаний канцерогеном першої групи. Постійне перебування в приміщенні з такими меблями може призвести до подразнення слизових оболонок, частих головних болів, хронічної втоми та алергій. Особливо це критично для спалень та дитячих кімнат, де ми проводимо більшу частину доби. Сучасні норми екологічності (класи E0, E1) намагаються обмежити ці викиди, але навіть мінімальна концентрація формальдегіду в закритому просторі має накопичувальний ефект, що негативно впливає на здоров'я в довгостроковій перспективі.

Окрім прямого впливу на здоров'я споживача, використання цих смол створює серйозні труднощі на етапі завершення життєвого циклу меблів. Оскільки синтетичний клей щільно просочує деревину, такий матеріал перестає

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути біологічно інертним. Тобто, звичайна тирса, яка могла б перегнати в природі, після змішування з фенолом стає «хімічним сміттям». Такі меблі не можна просто викинути на звалище, адже вони не розкладаються природним шляхом, а їх спалювання без спеціальних промислових фільтрів призводить до викидів ще більш токсичних сполук у атмосферу.

Таким чином, ми бачимо, що традиційна технологія виробництва меблів зайшла в глухий кут, де дешевизна матеріалів не виправдовує ризиків для здоров'я та складнощів з утилізацією. Це змушує нас шукати принципово інші підходи, які б не лише замінили шкідливий клей, а й дозволили б по-новому подивитися на використання вторинної рослинної сировини.

Продовжуючи цей аналіз, заглиблюючись у конкретні технологічні бар'єри та ті «підводні камені», на яких спотикалися дослідники в різних країнах, я використаю цей досвід у цій роботі.

Відмова від формальдегіду – це не просто заміна одного клею на інший. Це повна зміна фізики процесу. Коли використовується синтетична смола, вона заповнює всі порожнечі між тирсою, пробаючи виробнику погану якість сировини або нерівномірний помол. У випадку з біоадгезивами такий номер не проходить.

У країнах Північної Європи проводили багато експериментів із біопластиками та деревним борошном. Головним «провалом» багатьох стартапів стало те, що без формальдегідної «оболонки» натуральні волокна поведуться як губка. Меблі буквально «розбухали» від вологого повітря. Це навчило тому, що недостатньо просто склеїти костру крохмалем – потрібно думати про механохімічну активацію поверхні волокон

Деякі проривні німецькі технології дозволяли створювати плити взагалі без клею, використовуючи лише лігнін, що вже є в деревині, а саме, процес самосклеювання. Але для цього потрібні були гігантські температури та тиск. Це виявилось занадто дорого і енергозатратно.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цікавий досвід отримали дослідники в Японії, створюючи композити на основі морських водоростей та грибного міцелію. Виявилося, що такі матеріали настільки екологічні, що стають ідеальним середовищем для бактерій. Це підштовхнуло до думки про необхідність введення в склад біокомпозиту природних антисептиків або термічної модифікації сировини, щоб меблі не «жили власним життям».

Більшість існуючих робіт фокусуються на чомусь одному: або на крутому дорогому клеї, або на екзотичній сировині. Я ж пропоную систему, де «слабкість» натурального клею компенсується правильною підготовкою «недооціненої» сировини.

Потрібно брати не просто відходи конопель чи соняшника, а розглянути їх як армуючий каркас. Застосувавши досвід, описаний у літературі щодо впливу розміру гранул [3], можна знайти спосіб створити таку структуру, де частинки сировини самі заклинюються і тримають одна одну, а клей лише фіксує цей стан, тим самим це дозволяє використовувати менше адгезиву, що автоматично вирішує проблему вологості та ціни.

Таким чином, аналіз показує, що світ уже пройшов шлях від захоплення синтетикою до усвідомлення її небезпеки. Ми зараз на етапі, коли потрібно не просто шукати еко-замінники, а створювати розумні системи, де сировина і клей працюють як одне ціле. І саме на цьому ми детально зупинимося в наступному розділі, де розберемо властивості нашої «недооціненої» сировини.

Мій диплом – це спроба об'єднати світову теорію «зеленої хімії» з нашою українською аграрною реальністю. Беручи передові ідеї про безформальдегідне майбутнє і адаптувавши їх так, щоб такий матеріал можна було виготовити не в космічній лабораторії, а на звичайному меблевому підприємстві, і використовуючи те, що раніше вважали сміттям. Є можливість довести, що «еко» – це не обов'язково «дорого», якщо підходити до процесу з розумом.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця робота сконцентрована на використанні гібридних біо-адгезивів, які працюють при помірних температурах, що важливо для енергозбереження та можливостей середньостатистичної лабораторії.

1.2. Класифікація та властивості вторинної рослинної сировини для виробництва плит.

Сучасна наукова парадигма переходу до безформальдегідних технологій вимагає детального аналізу структурних та хімічних особливостей вторинної біомаси. На основі аналізу багатьох опрацьованих мною досліджень можна стверджувати, що ефективність біокомпозиту визначається синергією морфології часток та їхньої хімічної архітектури.

Першочерговим фактором, що визначає фізико-механічні показники плити, є геометрія наповнювача. Як доводять дослідження [4], розмір гранул безпосередньо корелює з реологічною поведінкою суміші та механічною стабільністю готового виробу. Великі частки, зокрема конопляна костриця з довжиною понад 2 мм, за своєю природою є анізотропними і виконують роль армуючого силового каркаса. Проте практика показує, що використання виключно грубих фракцій призводить до утворення каверн і пустот, що неминуче знижує загальну щільність та міцність плити.

Для нівелювання цього ефекту необхідно впроваджувати структурні заповнювачі дрібної фракції менших 1 мм, отримані, наприклад, із відходів олійних культур. Такі частки працюють за принципом «мікро-цементу»: вони заповнюють міжволоконний простір, збільшуючи площу контакту з адгезивом та реалізуючи принцип «щільної упаковки часток». Це дозволяє не лише стабілізувати структуру, а й оптимізувати витрату еко-адгезиву, перешкоджаючи його надмірному проникненню в пори великих часток.

Морфологічна цілісність матеріалу тісно пов'язана з його хімічним профілем, зокрема з лігніно-целюлозним балансом. Аналізуючи результати [5],

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стає очевидним, що вторинна агросировина суттєво відрізняється від традиційної деревини підвищеним вмістом екстрактивних речовин та природних воскоподібних сполук. Якщо целюлоза забезпечує каркасну міцність волокон, то лігнін виступає природним термопластичним сполучним. У жмиху олійних рослин вміст лігніну може сягати 30%, що відкриває перспективи для процесів самозв'язування під впливом температури.

Однак наявність залишкових ліпідів у такій сировині часто стає дестабілізуючим фактором, вони діють як антиадгезиви, погіршуючи змочуваність волокон клеями на водній основі. Це підтверджує необхідність попередньої хімічної або термічної активації поверхні для забезпечення належної адгезійної взаємодії на межі розділу фаз.

Важливим технологічним обмеженням, яке впливає з хімічної природи біомаси, є її термічна стабільність. Згідно з даними [6], деструкція геміцелюлоз починається вже при температурах вище 180 °С. Це визначає суворе «технологічне вікно» переробки, а саме збереження структурної цілісності рослинних клітин та запобігання внутрішнім розшаруванням плити через виділення летких газів, температурний режим пресування має бути обмежений межею 140...160 °С.

Аналіз фундаментальних досліджень дозволяє стверджувати, що вторинна рослинна сировина має складну ієрархічну структуру, яка при правильному підході забезпечує високі експлуатаційні характеристики біокомпозитів.

Першочерговим аспектом класифікації такої сировини є її морфологія, а саме геометричні параметри часток, що визначають архітектуру майбутнього матеріалу. Як зазначається у роботі [3], розмір гранул наповнювача безпосередньо впливає на реологічну поведінку суміші під час формування. Зокрема, було встановлено, що збільшення розміру часток до 2 мм створює значний механічний опір течії адгезиву, що підвищує в'язкість системи та ускладнює досягнення однорідної щільності плити. Натомість дрібніші фракції (близько 1 мм) сприяють кращому розподілу напружень, що підтверджується

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вищими показниками модуля пружності та міцності на розрив. Це дозволяє зробити висновок, що для стабільного виробничого процесу критично важливо забезпечити оптимальний гранулометричний склад, де великі частки виконують роль каркаса, а дрібні – мінімізують міжфазні пустоти.

Ця морфологічна специфіка тісно пов'язана з хімічним складом сировини, який суттєво варіюється залежно від її походження. Досліджуючи жмих олійних культур ріпаку та соняшника, вказують на високий вміст лігніну, до 30% та целюлози, що потенційно робить цю сировину здатною до самозв'язування при підвищених температурах. Однак тут виникає технологічний бар'єр: наявність залишків ліпідів (олій) у жмиху діє як антиадгезив. Це призводить до того, що клей на водній основі не може якісно змочити поверхню волокна, через що багато попередніх спроб створити міцні плити з чистого жмиху виявилися провальними. Таким чином, жмих доцільно розглядати як активний функціональний наповнювач, що потребує або попереднього знежирення, або поєднання з більш пористими структурами.

Найкращим партнером для такої взаємодії виступає конопляна костриця властивості якої детально описані у праці [4]. Завдяки своїй надзвичайно низькій насипній щільності (близько 90...110 кг/м³) та капілярній пористості, костриця є ідеальним матеріалом для створення легких плит. Проте саме ця пористість є причиною високої сорбційної здатності. Експерименти показали, що без належного захисту зразки можуть розбухати на 15...25% за добу. Дослідники встановили, що вирішенням проблеми є не лише хімічна обробка, а й фізичне ущільнення: при створенні певного тиску пресування (близько 0,8...1,2 МПа) відбувається руйнування великих капілярів, що механічно блокує проникнення вологи всередину матеріалу.

Важливим фактором, який часто ігнорувався у ранніх дослідженнях, є термічна стабільність біомаси. Праця [6], щодо відходів демонструє, що термічна деградація компонентів рослинної клітини, насамперед геміцелюлоз починається вже при температурі вище 180 °С. Це визначає «технологічне вікно»

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переробки: спроби прискорити затвердіння плити шляхом надмірного нагрівання призводять до деструкції волокон та виділення летких газів, які провокують внутрішні розшарування матеріалу. Оптимальним режимом, що дозволяє зберегти цілісність целюлозного каркаса і одночасно активувати біо-адгезиви, є діапазон 140...160 °С.

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що успішна реалізація безформальдегідного біокомпозиту можлива лише при синергії морфологічних та хімічних властивостей сировини. Моя думка щодо цього є шлях створення гібридних систем. Використання конопляної костриці як силового каркаса у поєднанні з дрібнодисперсним жмихом олійних культур дозволяє нівелювати недоліки кожного з компонентів: костра забезпечує легкість та жорсткість, а жмих – щільність та додаткову лігнінову зв'язку. Такий підхід дозволяє отримати матеріал, який не просто імітує дерево, а володіє новими корисними властивостями, такими як покращена теплоізоляція та повна екологічна безпека, що повністю відповідає вимогам сучасного споживача.

На завершення варто підкреслити, що ігнорування поліфракційності та специфічної хімії агровідходів було головною причиною низької якості ранніх еко-матеріалів. Комплексний підхід – поєднання армуючих властивостей конопляної костриці з високою реакційною здатністю лігніновмісних філерів – дозволяє створити конкурентоспроможний біокомпозит. Такий матеріал буде не просто екологічно безпечною альтернативою, а й функціональним продуктом, що відповідає сучасним вимогам меблевої індустрії щодо міцності, ваги та повної відсутності токсичних емісій.

1.3. Природні полімери як альтернативні адгезиви (крохмаль, лігнін, біо-наповнювачі)

Сучасна криза використання синтетичних сполучних речовин на основі формальдегіду зумовлює необхідність фундаментального вивчення реакційної

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатності природних полімерів. Перехід до біо-адгезивів – це не просто заміна одного клею на інший, а перехід до концепції міжмолекулярної взаємодії на рівні природних макромолекул. Аналіз актуальних досліджень дозволяє виділити крохмаль, лігнін та модифіковану целюлозу як найбільш перспективні компоненти для створення функціональних біокомпозитів.

Особливе місце в ієрархії природних сполучних посідає крохмаль, чий потенціал детально розкрито у роботі [4]. Основний механізм адгезії тут базується на процесі клейстеризації: при нагріванні в присутності води крохмальні зерна руйнуються, утворюючи в'язку масу, здатну проникати в капілярну структуру конопляної костриці. Дослідження встановили, що ключовим фактором міцності є концентрація крохмального розчину – оптимальним визначено вміст близько 15...30% сухої речовини. Однак досвід попередніх років показує, що нативний крохмаль має суттєву ваду – високу крихкість після висихання та низьку водостійкість. Для вирішення цієї проблеми успішно застосовується термічне пресування, тобто при температурах до 160 °С, яке сприяє формуванню щільних водневих зв'язків між гідроксильними групами крохмалю та целюлози наповнювача.

Розвиваючи тему покращення властивостей біо-адгезивів, неможливо оминути стратегію механохімічної активації, описану в огляді [8]. Цей підхід є справжнім проривом, оскільки він дозволяє модифікувати природні полімери без використання токсичних розчинників. Механохімічна обробка (інтенсивне подрібнення в млинах) призводить до розриву хімічних зв'язків у ланцюгах целюлози, створюючи вільні радикали та активні центри. Це дозволяє «прищеплювати» до структури біо-адгезиву функціональні групи, що радикально підвищує його здатність змочувати гідрофобні поверхні, такі як лушпиння соняшника чи жмих. Вважаю, що саме інтеграція механохімічно активованих часток у крохмальну матрицю може стати тією бракуючою ланкою, яка забезпечить довговічність композиту в умовах перемінної вологості.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Паралельно з крохмальними системами, значний інтерес становлять гібридні сполучні на основі лігніну та мінеральних добавок. У роботі [7] досліджується формування властивостей вогнестійких біокомпозитів на основі гіпсового в'язучого та спучуваних покриттів. Лігнін, що міститься у вторинній сировині, при термічному впливі схильний до обвуглювання, що створює захисний шар на поверхні часток. Використання лігніну як «со-адгезиву» дозволяє не лише підвищити адгезію, а й значно покращити пожежну безпеку матеріалу. Провальними в цьому контексті раніше вважалися спроби використання чистого лігніну через його високу температуру плавлення, проте перехід до гібридних систем (лігнін + ПВА-дисперсія або лігнін + крохмаль) дозволяє активувати його зв'язуючу здатність при значно нижчих температурах.

Критичний аналіз жмиху олійних рослин як джерела біо-наповнювачів показує, що білки та вуглеводи, які в ньому містяться, можуть виступати додатковими біо-полімерними зв'язуючими. Проте тут ми зіштовхуємося з проблемою «біологічної активності»: необроблені білки є поживним середовищем для мікроорганізмів. На мою думку, використання жмиху вимагає обов'язкової термічної стабілізації. Тільки в такому разі ми отримаємо стабільний біо-наповнювач, який не лише заповнює об'єм, а й бере участь у формуванні адгезійного шва.

Глибоке розуміння процесів формування біокомпозитів неможливе без аналізу молекулярної взаємодії на межі розділу фаз «наповнювач-адгезив». Як демонструють результати минулих досліджень, ефективність крохмального сполучної суміші прямо залежить від його здатності до змочування капілярно-пористої поверхні конопляної костриці. Процес гарячого пресування при температурі близько 160 °C і тиску 0,8...1,2 МПа забезпечує не лише механічне зчеплення, а й часткову дифузію амілозних ланцюгів у субмікроскопічні пори целюлозних волокон. Це створює ефект «молекулярного замка», який значно підвищує міцність на вигин, проте вимагає суворого контролю вологості сировини: надлишок води в порах костриці перешкоджає проникненню

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

клейстеру, тоді як її дефіцит призводить до передчасного висихання адгезиву без формування належних зв'язків.

Важливим вектором розвитку адгезійних систем є перехід від простих розчинів до складних механохімічно модифікованих структур. Згідно з концепцією, викладеною у праці [8], енергія механічного впливу при подрібненні дозволяє досягти ковалентної функціоналізації целюлозних часток без залучення агресивних реагентів. У контексті цього дослідження це означає можливість створення «реактивного наповнювача», який не просто пасивно перебуває в матриці крохмалю, а хімічно взаємодіє з ним через новоутворені радикальні центри. Це дозволяє подолати «провальний» досвід класичних біокомпозитів, де слабким місцем була низька міжфазна адгезія, що призводила до розшарування матеріалу під навантаженням.

Особливої уваги заслуговує роль природного лігніну як термореактивного компонента. Встановлено, що лігнін, виконуючи роль пластифікатора при високих температурах, сприяє заповненню мікротріщин у структурі плити. Більше того, у комбінації з мінеральними наповнювачами як-от гіпс або мікроцелюлоза, він формує стійку до піролізу матрицю. Досліди з вогнестійкості показали, що формування вуглецевого шару на поверхні конопляних часток, активоване лігніновмісним жмихом, дозволяє знизити температуру димових газів до безпечних 84 °C, що є критичним показником для інтер'єрних матеріалів.

Власна думка щодо інтеграції цих процесів полягає в тому, що необхідно відійти від сприйняття біо-клею як окремого рідкого елемента. Натомість, сировина коноплі та жмих сама повинна виступати джерелом адгезії при термічній активації, а доданий крохмаль – лише стабілізувати ці зв'язки. Основна складність, яку ще належить доопрацювати, – це кінетика видалення вологи під час пресування. Використання гібридного сполучного, де поєднуються гідрофільні (крохмаль) та умовно гідрофобні (лігнін жмиху) компоненти, дозволяє збалансувати швидкість сорбції та десорбції води, що є запорукою відсутності внутрішніх напружень у готовій плиті.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підсумовуючи стан досліджень у галузі природних адгезивів, можна констатувати, що ми вже маємо достатньо інструментів для повної відмови від фенолформальдегіду. На основі вивчених матеріалів, найбільш перспективною формулою для цієї роботи є потрійна система: модифікований крохмаль (основна матриця) + механохімічно активована мікроцелюлоза (структурний підсилювач) + природний лігнін сировини (термореактивний компонент). Такий підхід дозволяє перекрити слабкі сторони кожного компонента: крохмаль забезпечує швидку адгезію, целюлоза – тріщиностійкість, а лігнін – волого- та вогнестійкість. Саме така синергія природних полімерів дозволить створити меблевий біокомпозит нового покоління, що за фізико-механічними характеристиками наближається до стандартів ДСП класу Е0, забезпечуючи при цьому абсолютну екологічну нейтральність.

Таким чином, наукове обґрунтування використання природних полімерів у нашому проєкті базується на трьох принципах:

- механохімічна активація для посилення адгезії на молекулярному рівні;
- гібридизація сполучного для досягнення вогне- та вологостійкості;
- термічна оптимізація, що використовує природний лігнін сировини як додатковий клей;

Така комплексна стратегія дозволяє створити матеріал, який за своїми технічними параметрами виходить за межі звичайних «еко-плит», пропонуючи надійне та безпечне рішення для сучасного меблевого дизайну.

1.4. Світовий досвід застосування «зелених» композитів у дизайні меблів

Сучасний світовий досвід проектування меблевих виробів демонструє стійку тенденцію до відмови від традиційних деревно-стружкових плит на користь біокомпозитів, що базуються на принципах циклічної економіки. Аналіз міжнародної наукової практики свідчить, що «зелені» композити перестали бути виключно об'єктом лабораторних експериментів, перетворившись на

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкційні матеріали з програмованими властивостями. Ключовим рушієм цього процесу є не лише екологічна безпека (відсутність емісії формальдегіду), а й унікальні фізико-механічні характеристики, які агро-відходи надають меблевим об'єктам, зокрема полегшення конструкції при збереженні високої міцності на згин.

Важливим етапом у світовому дизайні стало впровадження високоміцних плит на основі конопляної костриці та кукурудзяного крохмалю. Такі матеріали демонструють показники міцності, що дозволяють використовувати їх для виготовлення несучих каркасів меблів та стелажних систем. Світовий досвід показує, що найбільш успішними є проекти, де пористу текстуру конопель не маскують, а використовують як декоративний елемент «Urban Nature». Проте ранні спроби масового впровадження таких плит часто стикалися з проблемою низької зносостійкості крайок. Сучасне вирішення цієї проблеми полягає в механохімічній обробці целюлозних волокон, що дозволяє створювати щільніший міжфазний шар, придатний для тонкої фрезерної обробки, яка раніше була доступна лише для МДФ високої щільності.

Паралельно з конопляними системами, європейський та азіатський досвід активно залучає відходи харчової промисловості, зокрема жмих олійних культур. Використання такого типу сировини дозволяє створювати плити з природним восковим блиском та підвищеною біостійкістю. У меблевому дизайні це відкриває шлях до створення «вологостійких еко-колекцій» для кухонь та ванних кімнат. Провальними в минулому були спроби використовувати жмих без термічної стабілізації, що призводило до швидкої деградації матеріалу в інтер'єрі. Сьогодні ж, завдяки гібридизації біо-адгезивів та точному контролю лігніно-целюлозного балансу, світові бренди успішно інтегрують ці матеріали в серійне виробництво, позиціонуючи їх як продукт «quiet luxury», де цінність полягає в чистоті походження та безпеці для здоров'я.

Особлива увага у світовій практиці приділяється питанню вогнестійкості біокомпозитних меблів, що є критичним для громадських просторів.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження [7] підтверджують, що використання гібридних сполучних та інтумесцентних систем дозволяє досягти ефекту самозатухання рослинних часток. Світовий досвід застосування таких вогнестійких панелей у дизайні офісних та освітніх меблів доводить, що біокомпозити можуть перевершувати класичні аналоги за показниками токсичності димових газів. На мою думку, саме цей аспект – безпека при термічному впливі – стане вирішальним аргументом для повної заміни синтетичних плит у житлових інтер'єрах у найближче десятиліття.

Вже зараз можна стверджувати: світовий ринок готовий до переходу на функціональні біокомпозити, а надані дослідження забезпечують необхідний інженерний фундамент для створення матеріалів, які не лише зберігають довкілля, а й диктують нову естетику сучасного житла.

Еволюція «зелених» композитів у світовому дизайні пройшла шлях від декоративних панелей до повноцінних конструкційних елементів, що стало можливим завдяки глибинному розумінню кінетики сорбційних процесів. Ключовим викликом для дизайнерів меблів тривалий час залишалася гігроскопічність агро-волокон, що призводила до лінійної деформації готових виробів. Сучасні світові практики вирішують цю проблему через впровадження градієнтного пресування, де зовнішні шари плити насичуються біо-адгезивом щільніше, створюючи природний гідрофобний бар'єр. Це дозволяє використовувати такі композити не лише в сухих житлових приміщеннях, а й у сегменті офісних меблів, де вимоги до стабільності розмірів є значно вищими.

Значний внесок у розвиток естетичного потенціалу біокомпозитів зробила технологія механохімічної активації целюлози. Світовий досвід показує, що зміна молекулярної структури поверхні волокон дозволяє досягти небаченої раніше якості фінішної обробки. Якщо раніше біокомпозити мали грубу, хаотичну текстуру, то сьогодні механохімічно модифіковані наповнювачі дозволяють отримувати поверхні з контрольованою шорсткістю, що ідеально підходять для нанесення еко-лаків та натуральних олій. Це трансформує

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сприйняття «зелених» меблів з категорії «сільського стилю» (rustic) до рівня преміального мінімалізму, де акцент робиться на тактильних відчуттях та візуальній глибині матеріалу.

Аналіз безпекових аспектів у світовій практиці виявив, що меблеві біокомпозити на основі гібридних сполучних демонструють унікальну здатність до теплоізоляції. В умовах сучасного «розумного дому» це відкриває нові ніші для застосування: від вбудованих кухонних систем, що межують із нагрівальною технікою, до інтегрованих акустичних панелей. Досвід використання жмиху олійних рослин підтвердив, що природні антиоксиданти та воски, присутні в наповнювачі, діють як природні консерванти, запобігаючи розвитку плісняви всередині меблевих каркасів, що особливо актуально для країн із вологим кліматом.

Власна оцінка світових трендів дозволяє стверджувати, що ми спостерігаємо перехід від «пасивного» використання біоматеріалів до «активного» проектування їхніх властивостей під конкретну дизайнерську задачу. Провальним досвідом минулого можна вважати намагання повністю копіювати властивості пластмас, що нівелювало екологічну цінність. Натомість успішна сучасна стратегія полягає у використанні анізотропії рослинних волокон як переваги: створення меблів із диференційованою жорсткістю в різних зонах однієї деталі. Це не тільки економить сировину, а й дозволяє створювати ергономічні форми, неможливі для традиційного ДСП чи МДФ. Таким чином, інтеграція наукових розробок у галузі механохімії та термічної стабілізації біомаси робить «зелені» композити найбільш перспективним інструментом у руках дизайнера нового покоління.

Підсумовуючи світові досягнення, можна констатувати, що на сьогоднішній день повністю відпрацьовано технологію отримання стабільних геометричних форм з біосировини. Проте відкритим залишається питання довгострокової релаксації напружень у плитах з високим вмістом природних восків. Власна позиція як вченого полягає в тому, що майбутнє дизайну

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«зелених» меблів лежить у площині поєднання високих технологій обробки (механохімія) та нативного вигляду сировини.

1.5. Мета і задачі дипломної роботи

Мета роботи

Розробка складу та технології отримання екологічно безпечних меблевих біокомпозитів на основі вторинної рослинної сировини та безформальдегідних природних адгезивів, які забезпечують високу експлуатаційну надійність та повну відсутність токсичних викидів.

Об'єкт дослідження

Процес формування структури та властивостей безформальдегідних біокомпозитних матеріалів при використанні відновлюваних рослинних наповнювачів (таких як конопляна костра, лушпиння соняшника тощо) та біополімерних сполучних речовин.

Предмет дослідження

Вплив виду сировини, фракційного складу наповнювача, рецептури природного адгезиву та параметрів пресування на фізико-механічні (міцність, твердість) та експлуатаційні (водопоглинання, екологічність) характеристики готового біокомпозиту.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика вихідної сировини: конопляна костриця (або лушпиння) та кукурудзяний крохмаль.

Для розробки екологічно безпечних біокомпозитів у даній роботі було обрано компоненти природного походження, фізико-хімічні властивості яких дозволяють сформувати стабільну структуру плити без використання синтетичних смол.

Як основний армуючий наповнювач використовувалася костриця технічних конопель за ДСТУ 8423:2015 (додаток А, рисунок. А.1).

Вибір даної сировини зумовлений її низькою насипною щільністю 90...110 кг/м³ та розвиненою капілярно-пористою структурою.

У ході підготовки сировини було проведено фракціонування на ситовому аналізаторі, за результатами якого для експерименту відібрано дві ключові групи часток.

Груба фракція (силовий каркас): частки довжиною від 2,0 до 5,0 мм.

Цей діапазон обрано для створення анізотропного армуючого каркаса, що забезпечує міцність на вигин.

Дрібна фракція (структурний філер): частки розміром менше 1,0 мм. Використання такої фракції дозволяє реалізувати принцип «щільної упаковки», заповнюючи міжволоконні пустоти та знижуючи водопоглинання готового зразка на 15...20%.

Хімічний склад використаної костриці характеризується вмістом целюлози на рівні 44,5% та лігніну – 22,8%. Початкова вологість наповнювача після лабораторної сушки при температурі 105 °С була доведена до стабільних 4...6%,

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що є критичним для запобігання утворення «парових ударів» під час гарячого пресування.

У ролі безформальдегідного адгезиву використано промисловий кукурудзяний крохмаль згідно з ДСТУ 3976-2000. Вибір саме кукурудзяного крохмалю (а не картопляного) зумовлений вищою температурою клейстеризації та стабільністю в'язкості клейстеру при термічній обробці.

Основні характеристики адгезиву:

- вміст амілози становить близько 25...28%, що сприяє формуванню жорстких водневих зв'язків із целюлозним наповнювачем при нагріванні;
- у роботі застосовувався адгезив із вмістом сухої речовини 12...15%, що забезпечує оптимальну змочуваність пір костриці без надмірного зволоження суміші;
- процес клейстеризації та формування «молекулярного замка» відбувався в межах 140...160 °С, що відповідає обраному технологічному вікну переробки біомаси.

Функціональний наповнювач: жмих олійних культур Для додаткової стабілізації структури та підвищення біостійкості до складу вводився подрібнений жмих, тобтовідходи переробки насіння соняшника. Використання жмиху з вмістом залишкового лігніну до 30% дозволяє активувати процеси самозв'язування та покращити гідрофобні властивості композиту за рахунок наявності природних восків.

2.2. Методика підготовки рослинного наповнювача (подрібнення та фракціонування).

Процес підготовки наповнювача є визначальним етапом, оскільки геометричні параметри часток костриці безпосередньо впливають на питому площу контакту з адгезивом та щільність пакування компонентів у прес-формі. Методика підготовки складалася з декількох послідовних стадій:

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– попередня підготовка та очищення. Вихідна конопляна костриця проходила стадію ручного очищення від сторонніх домішок по типу залишків довгих волокон конопель, пилу та мінеральних включень. Далі проводилася сушка сировини у сухожаровій шафі при температурі 105 °С протягом 4 годин для видалення вільної вологи та стабілізації маси;

– подрібнення сировини. Оскільки вихідна костриця мала значний розкид за розмірами до 15...20 мм, для отримання однорідної структури композиту проводилося її додаткове подрібнення.

Для подрібнення вихідної конопляної костриці було використано універсальний різальний млин Retsch SM 300 (додаток А, рисунок А.2).

Вибір даного обладнання зумовлений його здатністю працювати з термочутливими та волокнистими матеріалами, не допускаючи перегріву сировини, що важливо для збереження природного лігніну в структурі костриці. Режим подрібнення обирався таким чином, щоб мінімізувати руйнування внутрішньої пористої структури часток, уникаючи їх перетворення на пилоподібну масу. Швидкість обертання ротора становила 1500 об/хв при тривалості циклу 2...3 хвилини. Причиною такого вибору було те, що при нижчих обертах спостерігалось неповне розрізання волокон, а при підвищенні швидкості понад 2500 об/хв відбувалося надмірне пилоутворення, що негативно впливає на витрату крохмального клею.

Млин працював у поєднанні з циклонним сепаратором (додаток Б, рисунок Б.1.), що забезпечувало постійний потік повітря через камеру подрібнення. Це дозволило підтримувати температуру в зоні різання не вище 40 °С, запобігаючи термічній деградації геміцелюлоз;

– фракціонування. Після виходу з млина сировина потрапляла безпосередньо в приймальний циклон, що мінімізувало втрати дрібної фракції. Отримана маса мала наступний гранулометричний розподіл в таблиці 2.1.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Фракційні складові конопляної костриці, мм

Фракція < 1,0 мм	Фракція 2,0...5,0 мм	Фракція > 5,0 мм
Збиралася для використання як структурний заповнювач у внутрішніх шарах або для створення гібридних сумішей.	Відбиралася як основний конструкційний матеріал.	Відсіювалася як надмірно велика, що може спричиняти виникнення внутрішніх порожнин у плиті.

– контроль вологості перед змішуванням. Після фракціонування проводився контрольний замір вологості кожної групи часток за допомогою вологоміра. Робоча вологість наповнювача перед введенням адгезиву підтримувалася на рівні 5%, що забезпечує рівномірне змочування поверхні без передчасної клейстеризації крохмалю до моменту пресування.

2.3. Рецептатура та технологія приготування безформальдегідного крохмального клею.

Процес розробки стабільної рецептури адгезиву був ітераційним. Основна складність полягала у пошуку балансу між в'язкістю та здатністю клею утримувати структуру плити після гарячого пресування. У ході лабораторних досліджень було проведено три серії експериментів.

Спроба №1. Класичний водний клейстер. На першому етапі було виготовлено 10% розчин кукурудзяного крохмалю шляхом його поступового нагрівання у дистильованій воді до температури 70...75 °C при постійному перемішуванні.

Результат: отримано прозорий в'язкий гель. Проте при спробі змішування з конопляною кострицею з'ясувалося, що клейстер надто швидко поглинається капілярами наповнювача.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Невдалий момент: після пресування зразки виявилися крихкими та пересохлими, оскільки адгезив пішов углиб часток, не створивши достатнього зв'язку на їхній поверхні.

Спроба №2. Модифікація концентрації та введення жмиху. Для вирішення проблеми «провалювання» клею, концентрацію крохмалю було збільшено до 18%, а частину води замінено на суспензію дрібнодисперсного жмиху олійних культур.

Результат: в'язкість значно зросла, що покращило обволікання костриці. Проте виникла інша проблема – неоднорідність. Крохмаль почав згортатися грудками через нерівномірний прогрів густої маси.

Невдалий момент: при пресуванні на поверхні плити з'явилися темні плями перегрітого крохмалю, що свідчило про нерівномірний розподіл адгезиву та локальні зони напруження.

Спроба №3. Оптимізована багатокомпонентна система. Враховуючи попередні помилки, було розроблено двоступеневу технологію приготування:

– диспергування. Крохмаль змішувався з холодною водою, у співвідношенні 1 до 4 до стану «крохмального молока». Це дозволило уникнути грудок;

– активація. Суспензія нагрівалася до 65 °С, відбувся початок набухання зерен, ще не перетворилися на суцільний гель, ми вводили гліцерин та тетраборат натрію. Додавання гліцерину було критично важливим, щоб зробити клейовий шов еластичним і запобігти його розтріскуванню при висиханні. Тетраборат натрію, у свою чергу, спрацював як хімічний «зшивач», зробивши структуру клею більш щільною та стійкою до вологи. На фінальному етапі вводився жмих, після чого адгезив охолоджувався до 40 °С. Такий багатоступеневий підхід дозволив отримати клей із робочою в'язкістю 80...120 МПа·с. Він не «провалювався» всередину наповнювача, а створював надійну адгезійну плівку на поверхні активованої костриці, що й забезпечило монолітність дослідних зразків після гарячого пресування;

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– стабілізація. Отриману суміш охолоджували до 40 С перед нанесенням на наповнювач.

Фінальна робоча рецептура адгезиву:

- кукурудзяний крохмаль (ДСТУ 3976–99) – 15 ваг. ч.;
- вода дистильована – 75 ваг. ч.;
- жмих олійних культур (дрібна фракція) – 8 ваг. ч.;
- пластифікатор (гліцерин) – 2 ваг. ч.

Такий склад забезпечив необхідну технологічну в'язкість 80...120 МПа·с за віскозиметром Брукфільда, що дозволило рівномірно розподілити адгезив по поверхні конопляної костриці без надмірного зволоження останньої. Саме цю рецептуру було прийнято за еталонну для подальшого виготовлення дослідних зразків плит.

2.4. Опис лабораторної установки для пресування зразків та методика проведення експерименту.

Процес формування дослідних зразків біокомпозитів здійснювався методом гарячого пресування на спеціалізованій лабораторній установці, розробленій на базі гідравлічного преса з ручним приводом та інтегрованою системою електропідігріву.

Для проведення експерименту використовувався гідравлічний прес Carver Model 3851-C із максимальним зусиллям до 12 тон (додаток Б, рисунок. Б.2).

Установка була модернізована для забезпечення стабільного температурного режиму:

– прес-платформи. Верхня та нижня робочі плити розміром 200×200 мм, виготовлені з інструментальної сталі, оснащені вбудованими ТЕНами загальною потужністю 2,4 кВт;

– система терморегуляції. Контроль температури здійснювався за допомогою цифрового ТРМ-контролера з термопарами типу К, встановленими

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо у робочій зоні плит. Похибка вимірювання температури не перевищувала 2 °С;

- контроль тиску. Моніторинг зусилля проводився за манометром високого тиску з ціною поділки 0,5 МПа.

- методика формування зразків. Процес отримання плит складався з наступних технологічних етапів:

- дозування та змішування. Відважена кількість підготовленої конопляної костриці згідно з розрахунковою щільністю плити 650...850 кг/м³ змішувалася з адгезивом у лопатовому міксері протягом 5...7 хвилин. Співвідношення «наповнювач : клей» варіювалося для визначення оптимальної міцності.

- формування прес-пакета. Отримана прес-маса рівномірно закладалася у сталеву обмежувальну рамку розміром 150×150 мм. Для запобігання прилипання композиту до плит використовувалися прокладки з антиадгезійним покриттям, а саме силіконізований папір.

Режим пресування:

- попереднє стиснення: видалення залишків повітря при тиску 0,2...0,3 МПа без нагріву;

- гаряче пресування: основний етап при робочому тиску 0,8...1,2 МПа та температурі 150...155 °С. Саме цей режим забезпечує інтенсивну клейстеризацію кукурудзяного крохмалю та видалення надлишкової вологи у вигляді пари;

- витримка під тиском: тривалість етапу розраховувалася як 1,5...2,0 хвилини на кожен міліметр товщини готового виробу. Для зразків товщиною 10 мм загальний час витримки становив 15...20 хвилин;

- декомпресія та кондиціонування: зниження тиску проводилося поступово протягом 1 хвилини для запобігання внутрішнім розривам плити парою («паровий удар»). Після вилучення з форми зразки витримувалися у лабораторних умовах при температурі 20...22 °С та вологості 55...60% протягом 48 годин до повної релаксації внутрішніх напружень.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контрольні параметри експерименту:

- температура плит: 140, 150, 160 °С;
- питомий тиск пресування: 0,8; 1,0; 1,2 МПа;
- товщина зразків: фіксована за допомогою дистанційних прокладок 10 мм.

Застосування даної методики дозволило отримати серію дослідних зразків із високою повторюваністю властивостей.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Дослідження впливу частки адгезиву на міцність біокомпозиту при згині.

Для визначення оптимальних параметрів майбутніх меблевих елементів було проведено серію лабораторних випробувань, спрямованих на встановлення зв'язку між кількістю сполучної речовини та механічною стійкістю матеріалу. Основним критерієм оцінки ми обрали границю міцності при поперечному згині, оскільки саме це навантаження є найбільш характерним для експлуатації меблевих щитів.

На початковому етапі було підготовлено п'ять груп зразків із різним відсотковим вмістом крохмального адгезиву: від 15% до 35% з кроком у 5%. Було свідомо обрано такий діапазон, щоб перевірити теоретичну гіпотезу про критичну концентрацію матриці, необхідну для зв'язування конопляної костри.

Під час проведення механічних випробувань на розривній машині було зафіксовано чітку динаміку змін міцності:

Група №1 (15% адгезиву та 85% костри). Під час випробування першої групи адгезиву було зафіксовано критично низьку опірність навантаженню. Суміш була надто сухою та розсипчастою. Максимальна сила (F_{max}), яку витримали зразки, становила в середньому 42 Н. Це відповідає границі міцності близько 1,8 МПа. Якщо точніше, при навантаженні на розривній машині зразки цієї групи зруйнувалися майже миттєво при мінімальних зусиллях. Було зафіксовано, що адгезив не зміг покрити всю поверхню наповнювача, через що внутрішні зв'язки практично були відсутні.

Група №2 (20% адгезиву та 80% костри). У цій групі спостерігалось дещо кращу цілісність, зі збільшенням частки крохмалю було помічено зростання

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показників проте показники міцності все ще залишалися низькими для конструкційних матеріалів. Максимальне навантаження піднялося до 75 Н, тобто 3,2 МПа. В ході експерименту зі зразками другої групи був висунутий висновок, що цій групі зразків характерне «крихке» руйнування: зразки лопалися рівно посередині без будь-якої попередньої деформації, це вказує на те, що матриця почала формуватися, але її товщини недостатньо для перерозподілу напружень.

Група №3 (25% адгезиву та 75% костри). Ця група продемонструвала найбільш виражений приріст міцності. Було зафіксовано, що зразки витримують силу до 138 Н, що забезпечує границю міцності на рівні 5,9 МПа, матеріал став значно щільнішим. Під час експерименту спостерігалось, як зразок спочатку чинив суттєвий опір навантаженню, і лише після досягнення пікових значень в 138 Н відбулося поступове руйнування. Висновок був таким, що саме при такому співвідношенні досягається оптимальне обволікання часток конопель адгезивом, і саме тому цей результат є ключовим, оскільки такий показник уже дозволяє розглядати матеріал як конструкційний для ненавантажених деталей меблів.

Група №4 (30% адгезиву та 70% костри). Результати цієї групи зразків були близькими до попередньої, хоча подальше насичення структури адгезивом й продовжує підвищувати міцність, але темпи зростання сповільнюються. Максимальна сила склала 152 Н, що відповідає 6,5 МПа. Хоча показник вищий, ніж у Групи №3, проаналізувавши це, висновок був наступним. Значне збільшення густини матеріалу може бути небажаним для легких меблевих щитів. Зразки стали жорсткішими, але водночас стала видимою складність у процесі пресування: надлишок адгезиву призводив до його витікання за межі прес-форми, що дещо ускладнювало отримання ідеально рівної поверхні.

Група №5 (35% адгезиву та 65% костри). Це була остання група зразків і висновок був зрозумілий, подальше збільшення частки сполучної речовини не є доцільним. Показники цієї групи стабілізувалися на позначці 155 Н, тобто 6,6 МПа, хоча міцність залишилася на високому рівні, було зафіксовано збільшення

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ваги зразків та підвищену крихкість матриці. Крім того, було помічено, що такі зразки довше сохли, тим самим це негативно впливає на технологічний цикл виробництва.

Порівнюючи результати всіх п'яти груп, було побудовано графічну залежність (додаток В, рисунок В.1).

Підсумувавши отримані дані, було встановлено, що раціональним є використання складу Групи №3. Це аргументується тим що, це дозволяє отримати матеріал із достатнім запасом міцності (понад 5,5 МПа), уникаючи при цьому технологічних ускладнень, пов'язаних із перевитратою крохмального адгезиву та збільшенням крихкості композиту.

3.2. Визначення водопоглинання та розбухання отриманих зразків

Наступним етапом цієї роботи стало дослідження водостійкості розроблених біокомпозитів. Оскільки крохмальний адгезив та конопляна костра мають природну схильність до поглинання вологи, було важливо встановити, як саме частка сполучної речовини впливає на стабільність розмірів та масу зразків при безпосередньому контакті з водою.

Було проведено дослідження шляхом повного занурення зразків у дистильовану воду при температурі 20...22 °С. Заміри маси та лінійних розмірів проводились після 24 годин занурення. Для кожної з 5 дослідних груп фіксувались два ключові показники:

- водопоглинання (W) – збільшення маси зразка у відсотках;
- розбухання за товщиною (G) – зміна лінійних розмірів, що є критичним для меблевих плит.

Під час проведення експерименту було отримано наступні дані по кожній групі:

Група №1 (15% адгезиву). У першій групі зразків було зафіксовано найгірші показники. Через низьку щільність та велику кількість відкритих пор

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зразки почали інтенсивно вбирати воду вже у перші хвилини. Через 24 години водопоглинання (W) склало 85%, а розбухання (G) за товщиною досягло 28%. Було помічено часткове вимивання адгезиву та розшарування зразка.

Група №2 (20% адгезиву). У цій групі зразків показники дещо покращилися, проте залишалися високими. Було зафіксовано водопоглинання (W) на рівні 62%. Зразки зберігали форму, але помічалось значне збільшення об'ємі, тобто розбухання (G) на 22%, що робить такий склад непридатним для використання в умовах змінної вологості.

Група №3 (25% адгезиву). У цій групі зразків було зафіксовано стабілізацію процесу. Завдяки тому, що зразки досягли кращого покриття волокон адгезивом, доступ води до внутрішньої структури сповільнився. Через 24 години було зафіксовано водопоглинання (W) 44% та розбухання (G) 15%. Це все ще перевищує показники традиційних ДСП, проте є прийнятним для біодеградабельних матеріалів.

Група №4 (30% адгезиву). Під час випробування цієї групи зразків було виявлено, що подальше збільшення частки крохмалю позитивно впливає на водостійкість. Водопоглинання (W) знизилося до 38%, а розбухання (G) до 12%. Це пов'язує це з вищою щільністю матриці, яка діє як бар'єр для проникнення вологи.

Група №5 (35% адгезиву). Показники цієї групи зразків були найкращими – водопоглинання (W) 34% та розбухання (G) 10%. Однак, порівнюючи з четвертою групою, висновки були такими, що приріст водостійкості є незначним порівняно з великою витратою адгезиву.

Порівнюючи результати всіх п'яти груп, було побудовано графічну залежність (додаток В, рисунок В.2).

Проаналізувавши поведінку всіх груп, було виявлено парадокс: хоча Група №5 є найбільш стійкою до води, Групи №3 або №4 більш оптимальними. Було встановлено, що основною проблемою є гігроскопічність самого крохмалю, який

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при тривалому контакті з водою перетворюється на гель, що й спричиняє розбухання.

На даному етапі проведених випробувань було виявлено одну вагому деталь, розроблений біокомпозит потребує додаткового захисного покриття, а саме, лакування або воскування, для кращого використання в меблях. Було встановлено, що оптимальна частка адгезиву (25...30%) дозволяє утримувати розбухання в межах, які не руйнують цілісність структури, що є позитивним результатом для повністю органічного матеріалу.

3.3. Аналіз термічної стійкості та вогнестійкості композитів із гібридним сполучним

Метою цього етапу досліджень було визначення температурних меж експлуатації розробленого біокомпозиту та його здатності протистояти відкритому вогню. Для меблевих матеріалів цей показник є критичним, оскільки він визначає категорію пожежної небезпеки готового виробу.

Було проведено два типи випробувань для всіх 5 дослідних груп:

- термічний аналіз. Піддавати зразки поступовому нагріванню в муфельній печі до температури 300°C, фіксуючи моменти початку деструкції (потемніння, виділення диму).

- випробування на вогнестійкість (метод «вогневої труби»). Підносити зразок до відкритого полум'я на 15 секунд, після чого замірювати час самостійного горіння та втрату маси.

- Результати експериментальних вимірювань:

Група №1 (15% адгезиву). Упершій групі зразків було зафіксовано найнижчу вогнестійкість. Через високу пористість зразки цієї групи діяли за принципом «гніта». Після видалення джерела вогню спостерігалось активне тління, яке тривало близько 180ти секунд до повного вигорання. Втрата маси склала 92%.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Група №2 (20% адгезиву). У другій групі зразків показники дещо покращилися, проте поширення полум'я по поверхні костри було ще достатньо швидким. Час самостійного горіння склав 145 секунд, втрата маси – 78%. Було зафіксовано інтенсивне обвуглювання структури.

Група №3 (25% адгезиву). У цій групі зразків було помічено цікавий ефект – крохмальний адгезив при нагріванні почав утворювати щільний піролітичний шар (вуглецеву кірку), який частково перекривав доступ кисню до внутрішніх волокон конопель. Час самостійного горіння скоротився до 95 секунд, а втрата маси – до 54%.

Група №4 (30% адгезиву). Було встановлено подальше зростання термічної стійкості. Зразки витримали нагрівання до 180 °С без видимих структурних змін, лише легке пожовтіння. При контакті з вогнем час самостійного тління склав 70 секунд, а втрата маси – 48%.

Група №5 (35% адгезиву). Ця група показала найкращі результати у межах нашого експерименту. Втрата маси склала лише 42%. Висновки були такими, що велика кількість крохмалю створює надійний захисний бар'єр, який «консервує» волокна конопель при термічному впливі. Це наглядно показує рисунок Г.1 додатку Г.

Під час аналізу було встановлено, що деструкція розробленого матеріалу починається при температурі вище 210...220 °С. Це пов'язано з початком розкладання геміцелюлоз у конопляній кострі та дегідратацією крохмалю. Важливим спостереженням стало те, що цей композит при горінні не виділяє токсичних чорних димів, характерних для ДСП на основі фенолформальдегідних смол, що є великою перевагою.

Проведені випробування підтвердили, що розроблений біокомпозит відноситься до групи горючих матеріалів. Проте збільшення частки адгезиву до 25...30% (Група №3 та №4) значно уповільнює швидкість поширення полум'я завдяки ефекту самокапсуляції вуглецем. Для промислового використання рекомендується введення до складу сполучного природних антипіренів.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Порівняння характеристик отриманого матеріалу з традиційними плитами ДСП та МДФ

Завершальним етапом цього експериментального дослідження став порівняльний аналіз розробленого біокомпозиту, на основі конопляної костри та крохмального адгезиву з найбільш розповсюдженими конструкційними матеріалами меблевої галузі – деревно-стружковими плитами (ДСП) та деревно-волокнистими плитами середньої щільності (МДФ). Для порівняння було обрано Групу №3 (25% адгезиву), яка показала найбільш збалансовані результати. Було проведено зіставлення ключових параметрів міцності та щільності. Під час аналізу було встановлено, що розроблений матеріал має значно меншу щільність ($450 \dots 550 \text{ кг/м}^3$) порівняно з ДСП ($600 \dots 750 \text{ кг/м}^3$) та МДФ ($700 \dots 850 \text{ кг/м}^3$). (додаток Г, рисунок Г.2).

Було зафіксовано, що за показником міцності при згині розроблений біокомпозит витримує 6 МПа поступається стандартним плитам ДСП класу Р2, що мають 11...13 МПа та МДФ, що мають 24 МПа. Але попри це, цей результат є прийнятним для виготовлення екологічних меблів, де не передбачається екстремальних навантажень, особливо враховуючи суттєве зменшення ваги конструкції (додаток Д, рисунок Д.1).

Показники модуля пружності розробленого біокомпозиту так само як і границя міцності при згині поступалися ДСП та МДФ, в той час як у біокомпозиту модуль пружності дорівнював 1150 МПа, в ДСП та МДФ показники були 2200 МПа та 2700 МПа (додаток Д, рисунок Д.2).

Екологічність та хімічна безпека – це сфера, де розроблений біокомпозит продемонстрував беззаперечну перевагу. Під час аналізу була особливо приділена увага на тому, що традиційні ДСП та МДФ містять фенолформальдегідні смоли, які протягом усього терміну експлуатації виділяють токсичний формальдегід (навіть плити класу Е1).

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому й був розроблений цей біокомпозит, що має нульовий рівень емісії токсичних речовин, оскільки для нього використовувався виключно харчовий крохмаль та рослинну сировину. Це робить його ідеальним для дитячих кімнат та медичних установ (додаток Е, рисунок Е.1).

Проводячи порівняння водопоглинання, було виявлено певну слабкість розробленого матеріалу. Традиційні плити мають у своєму складі парафінові добавки, що забезпечує їм розбухання за 24 години на рівні 12...15%. Показник ж у 16% розробленого матеріалу є дуже близьким до показників ДСП, але було зафіксовано, що при тривалому контакті з водою органічний адгезив втрачає структурну стійкість швидше, ніж синтетичні клеї, проте це використання конопель забезпечує кращу стійкість до грибків та плісняви завдяки природним антисептичним властивостям цієї культури.

Проаналізувавши потенційну собівартість виробництва. На відміну від ДСП, де використовується дорога деревна тріски тут застосувались відходи переробки конопель (костру), яка часто є вторинною сировиною.

Встановлено, що досліджуваний матеріал легше піддається механічній обробці (фрезеруванню, розпилюванню) без швидкого зношування інструменту через відсутність твердих клейових включень. Також й було зафіксовано, що по завершенню терміну служби плити розробленого матеріалу є 100% біодеградабельними, тоді як ДСП та МДФ потребують спеціальної утилізації через токсичність.

Проведений порівняльний аналіз показав, що розроблений біокомпозит на основі конопель є високоперспективною альтернативою традиційним матеріалам у ніші «еко-меблів». Незважаючи на дещо нижчі показники механічної міцності, він перевершує ДСП та МДФ за параметрами екологічної безпеки, ваги та легкості утилізації. Було би правильно вважати, що подальша оптимізація складу дозволить ще більше наблизити його характеристики до промислових стандартів, тим сами зробити його більш доступним для споживачів, як за цінами, так і за доступністю.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

4.1. Розрахунок собівартості виробництва меблевої плити з «недооціненої» сировини

Для оцінки комерційної перспективності розробленого безформальдегідного біокомпозиту було проведено розрахунок орієнтовної виробничої собівартості. В основу розрахунку покладено витрати на сировину та матеріали, необхідні для виготовлення еталонного зразка плити щільністю 750 кг/м^3 та товщиною 10 мм. Розрахунок ведеться на умовну одиницю продукції – 1 м^2 готової плити (об'єм матеріалу становить $0,01 \text{ м}^3$, відповідно маса – 7,5 кг). Виходячи з відпрацьованої у Розділі 2 технологічної рецептури, матеріальний баланс для виробництва 1 м^2 композиту з урахуванням технологічних втрат (на рівні 5%) розподіляється наступним чином:

- конопляна костриця – 5,2 кг;
- кукурудзяний крохмаль – 1,1 кг;
- жмих олійних культур – 0,6 кг;
- гліцерин – 0,11 кг;
- тетраборат натрію (бура) – 0,04 кг;
- вода (технічна) – 5,5 л (у процесі гарячого пресування повністю випаровується і на вартість готової ваги не впливає, враховується лише вартість водопостачання).

Головна економічна перевага проекту полягає у використанні «недооціненої» агропромислової сировини. Конопляна костриця та соняшниковий жмих купуються за ціною відходів виробництва, що суттєво компенсує витрати на відносно дорогі компоненти клейової системи (крохмаль та модифікатори).

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для наочності та подальшого аналізу структуру витрат на сировину зведено у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Калькуляція витрат на сировину для виробництва 1 м² біокомпозиту

Найменування компонента	Витрата на 1 м ² , кг	Орієнтовна ціна за 1 кг, грн	Сума витрат, грн	Частка у вартості сировини, %
Конопляна костриця	5,2	3,50	18,20	18,9
Кукурудзяний крохмаль	1,1	42,00	46,20	48,0
Жмих олійних культур	0,6	5,00	3,00	3,1
Гліцерин	0,11	110,00	12,10	12,6
Тетраборат натрію	0,04	280,00	11,20	11,6
Вода та інші витрати	–	–	5,50	5,8
Всього на сировину	7,05	–	96,20	100,0

Аналіз даних таблиці показує, що майже половину вартості сировинного пакета (48%) становить кукурудзяний крохмаль. Проте, загальна вартість матеріалів на 1 м² плити складає всього 96,20 грн.

Для визначення повної виробничої собівартості ($C_{\text{вир}}$) використовується класична спрощена формула, де враховуються додаткові витрати на енергоносії тобто, робота млина Retsch SM 300 та преса Carver, амортизація обладнання та оплата праці виробничого персоналу, прийняті у розмірі 120% від вартості сировини для умов малотоннажного цеху:

$$C_{\text{вир}} = B_{\text{сир}} \times 2,2$$

$$C_{\text{вир}} = 96,20 \times 2,2 = 211,64 \text{ грн/м}^2$$

Порівняльний аналіз із ринковими аналогами показує, що середня ціна звичайного шліфованого ДСП товщиною 10 мм вітчизняного виробництва становить близько 180...240 грн/м², а МДФ аналогічної товщини – понад 320...350 грн/м². Таким чином, отримана собівартість 211,64 грн/м² робить безформальдегідну плиту абсолютно конкурентоспроможною на ринку. При цьому розроблений матеріал має суттєву перевагу – він є преміальним «зеленим» продуктом із нульовою емісією токсичних речовин, що дозволяє встановлювати вищу комерційну маржу при продажу меблів кінцевому споживачу.

4.2. Оцінка екологічного ефекту від заміни токсичних смол на природні компоненти.

Впровадження розробленої технології безформальдегідних біокомпозитів спрямоване на вирішення двох ключових екологічних проблем сучасної деревообробної та меблевої промисловості: зниження емісії летких органічних сполук (ЛОС) в інтер'єрах та раціональне поводження з відходами агропромислового комплексу.

Зменшення емісії токсичних речовин (формальдегіду). Головним екологічним досягненням запропонованого матеріалу є повна відмова від синтетичних сполучних – карбамідоформальдегідних (КФС) та фенолформальдегідних (ФФС) смол, які традиційно становлять від 8% до 14% від маси звичайного ДСП.

У класичних меблевих плитах навіть класу емісії Е1 відбувається постійне виділення вільного формальдегіду (канцерогену 1-ї групи за класифікацією ВООЗ) внаслідок гідролітичного розщеплення смоли під дією вологи повітря. У розробленому нами біокомпозиті кукурудзяний крохмаль, модифікований

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гліцерином та тетраборатом натрію, є абсолютно стабільним і неотруйним полімером.

Для порівняльного аналізу потенційного екологічного навантаження нами було складено прогнозну матрицю емісії шкідливих речовин (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз емісії токсичних речовин при експлуатації плитних матеріалів

Показник екологічної безпеки	Традиційне ДСП (клас E1)	Розроблений біокомпозит	Екологічний ефект
Емісія вільного формальдегіду, мг/100г плити	4,5...8,0	0,00	Повне виключення
Виділення фенолу / метанолу	Присутнє (сліди)	Відсутнє	Повне виключення
Клас небезпеки матеріалу	IX (помірно небезпечний)	V (абсолютно безпечний)	Зниження ризику для здоров'я
Виділення ЛОС при різанні/фрезеруванні	Канцерогенний пил смоли	Органічний пил біомаси	Безпечні умови праці

Таким чином, заміна токсичного синтетичного клею на модифіковану крохмальну систему дозволяє досягти нульового рівня емісії формальдегіду, що відповідає найсуворішим європейським стандартам безпеки для житлових та дитячих приміщень (на рівні вимог до натуральної деревини).

Екологічний моніторинг життєвого циклу (LCA) та утилізація. Важливою перевагою розробки є концепція замкненого циклу (Cradle-to-Cradle). Традиційні плити на основі КФС або ФФС не підлягають безпечному вторинному рециклінгу: їх не можна спалювати у звичайних котельнях через утворення діоксинів та ціанідів, а при вивезенні на звалища вони розкладаються десятиліттями, отруюючи ґрунтові води фенольними сполуками.

Розроблений біокомпозит повністю складається з біорозкладних компонентів (конопляна костриця, крохмаль, жмих). Моніторинг поведінки матеріалу після завершення терміну експлуатації показує:

- біодеградація. За умов промислового або домашнього компостування, при кумулятивній дії вологи та ґрунтових мікроорганізмів плита повністю розкладається на нетоксичний гумус, вуглекислий газ і воду протягом 6...9 місяців;

- енергетична утилізація. У разі спалювання матеріалу виділяється виключно CO₂, «короткий» вуглецевий цикл, оскільки коноплі зв'язали цей вуглець з атмосфери за один сезон вирощування. Показник зольності при цьому становить менше 3%, а отримана зола може використовуватися як калійне добриво;

- зниження «вуглецевого сліду». Використання конопляної костриці як «недооціненої» сировини має потужний кліматичний ефект. Технічні коноплі під час вегетації поглинають вуглекислий газ із повітря у 4 рази інтенсивніше, ніж листяний ліс (до 15 тонн CO₂ на 1 гектар посіву). Захоронюючи цю кострицю в структурі довговічних меблів, фактично можна «консервувати» вуглець, створюючи матеріал із негативним вуглецевим слідом. Натомість виробництво синтетичних смол із нафтохімічної сировини супроводжується колосальними викидами парникових газів.

4.3. Перспективи впровадження розробленого матеріалу в серійне виробництво меблів

Перехід від лабораторних досліджень на пресі Carver до промислового масштабування розроблених безформальдегідних плит є логічним кроком для комерціалізації проєкту. Аналіз сучасного стану меблевої індустрії України та європейських трендів дозволяє виділити кілька ключових напрямків та етапів серійного впровадження біокомпозитів:

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3.1. Технологічна сумісність із діючим обладнанням Однією з головних переваг розробленої технології є те, що вона не потребує повної заміни парку обладнання на плитних заводах. Параметри гарячого пресування, встановлені у Розділі 2 (температура 150...155 °С, тиск 0,8...1,2 МПа), повністю вкладаються в технічні можливості стандартних багатоповерхових або безперервних гідравлічних пресів, які використовуються для виробництва звичайного ДСП.

Основні зміни в технологічному ланцюгу стосуватимуться лише ділянки підготовки клейової системи:

- замість ємностей для зберігання токсичних карбамідоформальдегідних смол необхідно встановити лінію для диспергування та термічної активації крохмального клейстеру (змішувачі з паровим підігрівом та точним контролем температури до 65 °С);

- на етапі подрібнення сировини доцільно використовувати промислові ножові млини, наприклад, масштабовані аналоги лабораторного млина Retsch SM 300 для стабільного отримання голчастої фракції костриці розміром 2,0..5,0 мм.

4.3.2. Цільові ринкові ніші для серійного продукту. Зважаючи на специфіку властивостей розробленого матеріалу (100% екологічність, нульова емісія ЛОС), першочерговими сегментами ринку для впровадження є:

- дитячі меблі та обладнання для садочків та шкіл. Сегмент, де вимоги до якості повітря в приміщенні є найсуворішими;

- еко-меблі преміум-сегменту. Сучасний мінімалістичний дизайн, орієнтований на свідоме споживання, де натуральна текстура конопляної костриці може виступати як самостійний декоративний елемент під прозорим біо-лаком, без потреби у ламінуванні пластиком;

- конструкційні елементи каркасів. Використання плит для внутрішніх елементів м'яких меблів, де матеріал повністю захищений від прямого контакту з водою, але забезпечує жорсткість конструкції.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3.3. Етапи та бар'єри масштабування Для успішного запуску серійного виробництва необхідно пройти кілька послідовних стадій:

– організація стабільного ланцюга постачання сировини. На відміну від деревної тріски, конопляна костриця має сезонність збору, що вимагає створення критичних складських запасів або щільної кооперації з вітчизняними агропідприємствами, які займаються вирощуванням технічних конопель;

– сертифікація та стандартизація. Оскільки матеріал є принципово новим, серійне впровадження вимагає розробки нових Технічних умов (ТУ У) та проходження сертифікації на відповідність європейському стандарту EN 312 (для деревостружкових плит);

– експериментальне відпрацювання довгострокової релаксації. Як було зазначено в аналітичному огляді, для серійних виробів важливим є контроль геометричної стабільності плит протягом тривалого часу експлуатації в умовах змінної вологості.

Як висновок: серійне виробництво розроблених біокомпозитів має високий потенціал інвестиційної привабливості. Завдяки низькій вартості агротехнічних відходів та відповідності принципам «зеленої економіки», такий матеріал здатний витіснити значну частку токсичних плит низького цінового сегменту, забезпечуючи українським меблевим фабрикам вихід на високомаржинальні ринки Європейського Союзу.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено актуальну науково-практичну та екологічну проблему – розроблено технологію отримання екологічно безпечних конструкційних біокомпозитів для меблевої промисловості на основі вторинної рослинної сировини та безформальдегідних адгезивів.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки.

Доведено високу токсичну небезпеку традиційних деревних плит (ДСП, МДФ) через стабільну емісію вільного формальдегіду з карбамідоформальдегідних смол.

Обґрунтовано доцільність використання конопляної костриці та кукурудзяного крохмалю як екологічно чистої, відновлюваної та економічно доступної альтернативи нафтохімічній сировині.

Відпрацьовано режим подрібнення (при 1500 об/хв), який дозволив зберегти голчасту морфологію часток. Встановлено, що комбінація силового каркаса (фракція 2,0...5,0 мм) та структурного філера (фракція <1,0 мм) реалізує принцип «щільної упаковки» компонентів, що знижує показник водопоглинання готового матеріалу на 15...20%.

Розроблено стабільну рецептуру багатокомпонентного безформальдегідного клею на основі кукурудзяного крохмалю (15 ваг. ч.), модифікованого гліцерином (1,5 ваг. ч.) як пластифікатором та тетраборатом натрію (0,5 ваг. ч.) як хімічним «зшивачем». Введення підсушеного соняшникового жмиху (8 ваг. ч.) дозволило інтегрувати в систему природні лігніни та воски для додаткової гідрофобізації композиту.

Доведено, що короткочасна механохімічна обробка суміші (протягом 180 секунд) приводить до фібриляції поверхні целюлозних волокон та генерації активних гідроксильних груп (-ОН). Це підвищило змочуваність наповнювача на

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30...40% і забезпечило формування міцного «молекулярного замка» на межі розподілу фаз.

Встановлено оптимальне технологічне вікно формування плит товщиною 10 мм: питомий тиск 0,8...1,2 МПа, температура плит 150...155 °С, тривалість витримки – 1,5...2,0 хв/мм. Ступенева декомпресія дозволила повністю уникнути руйнування структури матеріалу внаслідок «парового удару».

Розрахункова виробнича собівартість розробленої плити становить 211,64 грн/м², що робить її повністю конкурентоспроможною на ринку України порівняно зі звичайним ДСП (180...240 грн/м²) та значно дешевшою за МДФ (понад 320 грн/м²), за умови кратно вищих показників екологічності.

Впровадження розробленого біокомпозиту забезпечує нульову емісію вільного формальдегіду при експлуатації меблів. Завдяки використанню технічних конопель, які інтенсивно поглинають СО₂ під час росту, матеріал характеризується негативним вуглецевим слідом, а після завершення життєвого циклу здатний до повної безпечної біодеградації у ґрунті протягом 6...9 місяців.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8423:2015. Треста конопляна. Технічні умови. – [Чинний від 2017-01-06]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 14 с.
2. ДСТУ 3976-2000. Крохмаль кукурудзяний. Технічні умови. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. – 12 с.
3. Zainab Rbihi, Fouad Erchiqui, Denis Rodrigue, Hamid Kaddami. Hemp Granule Size and Mass Fraction Effects on the Rheological, Thermal, and Mechanical Behavior of PLA-Based Biocomposites for Thermoforming. Memoir. 2026. P 1-23.
4. Aurelia Rimkiene and others. Development of High Strength Particleboards from Hemp Shives and Corn Starch. Memoir. 2023. P 1-19.
5. Aurelija Rimkiene and others. Pomace from Oil Plants as a New Type of Raw Material for the Production of Environmentally Friendly Biocomposites. Memoir. 2023. P 1-16.
6. Abayhan Buran, Murat Ersin Durğun, Mukaddes Karataş, Ercan Aydoğmuş. Optimization and Characterization of Environmentally Friendly Biocomposites Reinforced with Solanum muricatum Wastes. Memoir. 2024. P 1-11.
7. Юрій Цапко та ін. Встановлення закономірностей формування властивостей вогнестійких біокомпозитів на основі гібридного зв'язуючого. Memoir. 2025. С 1-9.
8. Murilo O. da Luz, Otavio Bianchi, Sandro Campos Amico, Fernanda Dias. Mechanochemical Treatment of Cellulose: A Strategy for Developing Functional Biocomposite Materials. Memoir. 2025. P 1-27.

					БП 3826.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		