

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,
целюлози та паперу

УДК 674.093.26

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему:

**“ Вплив температури пресування на
фізичні властивості фанери,
виготовленої з березового шпону,
модифікованого лимонною кислотою,
склеєної первинною плівкою ПЕНГ ”**

Виконав: студент групи ТДКМ-61м
спеціальності 161 “Хімічні технології та
інженерія”


_____ Петро САПРУКА
(підпис)

Керівник: доц. каф. ТДКМ, к.т.н.


_____ Ірина КУСНЯК
(підпис)

Рецензент: *к.т.н. доц. каф. ТЗНГ ДБЖСД*
_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь)


_____ Сахаловський І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну
Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

д.т.н., проф. Руслан КОЗАК

“ 22 ” грудня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сапруці Петру Володимировичу

1. Тема роботи Вплив температури пресування на фізичні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної первинною плівкою ПЕНГ.
керівник роботи доц. кафедри ТДКМ Кусняк Ірина Іванівна, к.т.н.,
затверджені наказом університету від “ 28 ” жовтня 2024 року № С-846
2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати стан виробництва фанери в Україні, використання термопластичних плівок у виробництві фанери та способи підвищення адгезійних властивостей, вплив режимних параметрів пресування на фізичні властивості фанери, дослідити вплив концентрації модифікувальної речовини та температури пресування на фізичні властивості фанери.
4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
 1. Стан питання та завдання дослідження.
 2. Методика експериментальних досліджень.
 3. Обробка експериментальних даних.
 4. Висновки
5. Дата видачі завдання 25.07.2025 р.

Студент  Петро САПРУКА
(підпис)

Керівник роботи  Ірина КУСНЯК
(підпис)

Анотація

Метою даної дипломної роботи є дослідити, як концентрація модифікувального розчину та температура пресування впливають на адгезійні властивості фанери, зокрема фізичні. Для досягнення поставленої мети пропонується виконати досліди у два етапи: дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти за різної температури пресування на фізичні властивості фанери; дослідити вплив температури пресування на фізичні властивості фанери. Таке дослідження дозволить встановити оптимальні умови виробництва та сприятиме створенню екологічно безпечної фанери з підвищеними експлуатаційними властивостями, що є важливим для подальшого розвитку галузі.

В першому розділі проаналізовані види клейових матеріалів та модифікувальних речовин для покращення адгезійних властивостей фанери, а також вплив параметрів пресування на щільність, водопоглинання та набрякання фанери.

В другому розділі описана методика підготовки до поверхневого модифікування поверхні шпону та випробовування зразків фанери на фізичні властивості.

В третьому розділі наводяться результати випробувань, де проаналізовано вплив концентрації та температури пресування на щільність, водопоглинання після витримки у воді 24 год та набрякання за товщиною. Встановлено, що висока температура пресування – 180 °С негативно впливає на фізичні властивості фанери. Тоді як за температури 160 °С усі показники покращуються.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дипломної роботи складає 63 сторінки, з них 45 сторінок основного тексту, список літератури із 70 назв.

Ключові слова: фанера, ПЕНГ, лимонна кислота, модифікування шпону, температура пресування, щільність, водопоглинання та набрякання фанери за товщиною.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Виробництво фанери в Україні.....	7
1.2. Аналіз використання термопластичних плівок у виробництві фанери..	8
1.3. Аналіз способів підвищення адгезійних властивостей між шпоном та термопластичною плівкою.....	12
1.4. Вплив параметрів пресування на фізичні властивості фанери.....	15
1.5. Висновки.....	19
Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	21
2.1. Матеріали та реактиви.....	21
2.2. Вимірювальні прилади та обладнання.....	22
2.3. Методика модифікування поверхні шпону.....	23
2.4. Методика досліджень фізичних властивостей фанери.....	26
2.4.1. Виготовлення фанери.....	26
2.4.2. Випробування і визначення фізичних властивостей фанери.....	29
2.5. Статистична обробка даних результатів досліджень.....	33
Розділ 3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	36
3.1. Вплив концентрації модифікувального розчину на фізичні властивості фанери...	37
3.1.1. Щільність фанери.....	37
3.1.2. Водопоглинання фанери.....	39
3.1.3. Набрякання фанери.....	42
3.2. Вплив температури пресування на фізичні властивості фанери.....	44
3.2.1. Щільність фанери.....	44
3.2.2. Водопоглинання фанери.....	46
3.2.3. Набрякання фанери.....	47
3.3. Висновки.....	49
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	51
ДОДАТКИ	60

ВСТУП

Фанера є одним із найважливіших деревинних композиційних матеріалів, що широко застосовується у будівництві, меблевій промисловості, машинобудуванні, пакувальній галузі та багатьох інших сферах. Популярність фанери зумовлена її значною міцністю, стабільністю розмірів, достатньою тріщиностійкістю та економічністю виробництва. Вона складається з кількох шарів лушеного шпону, які склеюють між собою з взаємно перпендикулярним розташуванням волокон. Така структура забезпечує підвищені фізико-механічні показники порівняно з масивною деревиною. У зв'язку з постійним зростанням попиту на фанерну продукцію актуальність зберігають питання щодо підвищення її якості та удосконалення технологічних процесів виробництва.

На сучасному етапі традиційні фенолоформальдегідні (ФФ) та карбамідоформальдегідні (КФ) клеї залишаються найбільш уживаними у виробництві фанери. Вони забезпечують високу міцність з'єднання, біостійкість і доступність, проте мають суттєвий недолік – виділення формальдегіду, який є токсичним та канцерогенним. Низка наукових даних про шкідливість формальдегіду призвело до формування жорстких екологічних норм щодо його допустимого вмісту в продукції деревинних композиційних матеріалів. Це стимулює інтенсивний пошук альтернативних, екологічно безпечних систем склеювання.

Серед перспективних напрямів зниження токсичності фанерної продукції активно досліджуються клеї на основі природних полімерів – крохмалю, таніну, соєвих білків, лігніну [22]. Однак незважаючи на екологічні переваги, значним недоліком таких клеїв є низька водостійкість та обмежена міцність. У цьому контексті привертає увагу можливість застосування термопластичних полімерів (PE, PP, PS, PVC) як альтернативних клеючих матеріалів [6-26]. Результати численних досліджень підтверджують, що фанера, склеєна термопластичними полімерними плівками, може демонструвати цілком конкурентні фізико-механічні властивості порівняно з формальдегідними смолами.

Разом з тим, однією з ключових проблем залишається низька адгезія між гідрофільною поверхнею деревини та гідрофобними термопластами. Формування міцного з'єднання у системі “шпон – термопластичний полімер” відбувається переважно за рахунок механічного заклинювання та часткового проникнення розплавленого

полімеру у пори деревини. Тому покращення міжфазного контакту є необхідною умовою для отримання фанери високої якості. Серед відомих підходів значний інтерес становить хімічне модифікування шпону, яке дозволяє змінювати його поверхневу енергію, створювати активні функціональні групи та покращувати сумісність із термопластичними полімерними плівками. Важливим параметром формування якісного клейового з'єднання є також режим пресування – температура, тиск та тривалість пресування. Ці фактори безпосередньо впливають на розм'якшення чи плавлення полімерної плівки, її змочування поверхні шпону, рівномірність розподілу у клейовій лінії та глибину проникнення у пористу структуру деревини. Недостатні температура або час пресування призводять до неповного розплавлення полімеру й утворення слабких зон у клейовому шві. Натомість надмірні значення можуть спричинити термічні пошкодження деревини, деструкцію полімеру чи перенасичення клейової лінії. Тому вивчення впливу параметрів пресування є необхідним для оптимізації технологічного процесу та забезпечення стабільної якості продукції.

З огляду на це актуальним є комплексне дослідження, яке включає оцінку ефективності хімічного модифікування шпону та визначення впливу параметрів пресування, а саме температури на формування міжфазного з'єднання у фанері, склеєної первинною плівкою ПЕНГ. Таке дослідження дозволить встановити оптимальні умови виробництва та сприятиме створенню екологічно безпечної фанери з підвищеними експлуатаційними властивостями, що є важливим для подальшого розвитку галузі.

Мета роботи – з'ясувати фізичні властивості фанери, склеєної з хімічно модифікованого шпону первинною термопластичною плівкою ПЕНГ за різної концентрації розчину та температури пресування. Для досягнення поставленої мети було сформовано та вирішено наступні завдання:

- 1 Дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти за різної температури пресування на фізичні властивості фанери.
- 2 Дослідити вплив температури пресування на фізичні властивості фанери.

Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Виробництво фанери в Україні

У деревообробній галузі одним з найперспективніших видів деревинних композитів є фанера. Цей вид композиту найбільше використовують у меблевому виробництві для виробництва корпусних і м'яких меблів (шаф, столів, стільців, диванів), декоративних елементів (спинок крісел, фасадів шаф, внутрішніх перегородок), каркасів м'яких меблів тощо.

Основними виробниками фанерної продукції в Україні є наступні підприємства: ТЗОВ “ОДЕК” Україна” (Рівненська обл.), ТЗОВ “Костопільський фанерний завод” (Рівненська обл.), ПРАТ “СВРОШПОН-СМИГА” (Рівненська обл.), ТЗОВ “Фірма-Язьм” (Львівська обл.), УДФ (UDF) (Київська обл.), ТЗОВ “Уніплит” (Івано-Франківська обл.), WHITEWOOD (Житомирська обл.) та інші [1]. Так, наприклад, Львівський фанерний завод ТЗОВ “Фірма-Язьм” та ТЗОВ “Костопільський фанерний завод” виробляють водостійку березову та вільхову фанери марки ФК, класу емісії E1. ТЗОВ “Уніплит” виробляє фанеру підвищеної водостійкості марки ФК-М, класу емісії E1. ТЗОВ “ОДЕК” Україна” має найбільший асортимент виробництва фанери: ФК, ФСФ, ламінованої, важкогорючої. Крім того, дане підприємство є найбільшим виробником фанери в Україні. У 2021 році річне виробництво становило 115 тис. м³ фанерної продукції, що відповідає близько 50% загального випуску фанери в Україні.

Щороку попит на виробництво фанери зростає в Україні. Це пов'язано із стрімким збільшенням житлового будівництва. Ріст зростання виробництва фанери з 2011 до 2021 року сягнув 114,88 %, а приріст – 14,88 %, склавши 193 тис. м³ (рис. 1.1) [2, 3].

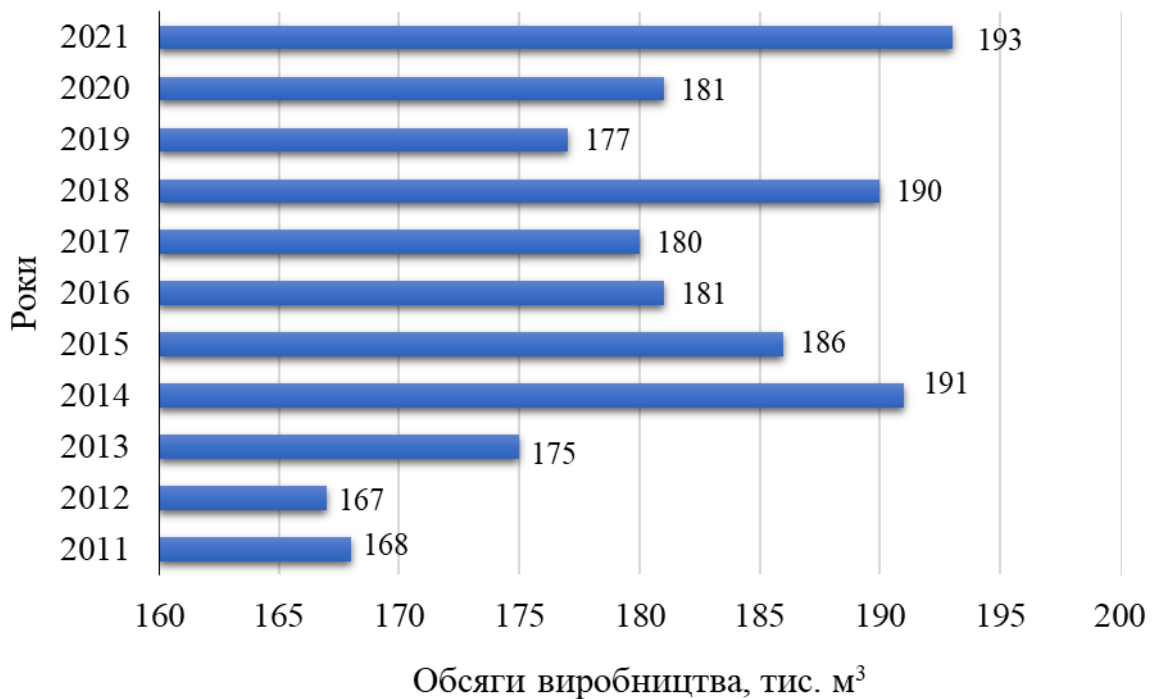


Рис. 1.1 – Обсяги виробництва фанери в Україні з 2011 до 2021 р. [2, 3]

Статистичні дані щодо виробництва фанерної продукції в Україні з 2022 по 2025 рр., на жаль, відсутні із-за військової агресії в країні. Відомо, що в кінці липня 2024 року було експортовано з України понад 128 000 м³ фанери до Європейського Союзу на суму близько 107 млн. \$ [4]. Середня ціна за кубометр становила приблизно 836 \$, що на 19 % менше, ніж у попередньому році.

Зважаючи на статистичні дані щодо виробництва фанерної продукції в Україні, її експорт та відбудову країни після завершення війни, можна спрогнозувати перспективу подальшого її розвитку.

1.2. Аналіз використання термопластичних плівок у виробництві фанери

Використання термопластичних полімерів у виробництві деревинних композиційних матеріалів (ДКМ), зокрема фанери, є актуальним напрямком сучасної деревообробної галузі. Значна частина наукових досліджень

присвячена можливості склеювання листів лущеного шпону термопластичними плівками [5, 6–26]. Зацікавлення до цього напрямку обумовлений рядом переваг термопластичних полімерів у вигляді плівок: екологічність, доступність, зручність у застосуванні та покращення умов праці на виробництві.

Багато дослідників пропонують використовувати термопластичні плівки на основі поліетилену (ПЕНГ, ПЕВГ), поліпропілену (PP) та полістиролу (PS) для склеювання листів шпону. Найбільш доступними є плівки на основі поліетилену низької густини (ПЕНГ) та поліетилену високої густини (ПЕВГ), які досліджені в більшості експериментальних робіт [5, 7–15, 21–26].

Дослідження впливу параметрів пресування пакетів шпону, склеєних термопластичними плівками у виробництві фанери проводилися в наступних працях:

- Bekhta and Sedliačik [5] виготовляли фанеру із вільхового шпону та плівки ПЕВГ. Оптимальні умови пресування: температура – 160 °С, тиск – 0,8 МПа, тривалість – 3 хв. Результати порівнювали із фанерою, склеєною клеями КФ та ФФ.

- У роботі [7] шпон мав вологість 4–6 %, плівка ПЕВГ товщиною 0,05 мм, пресування проводили при змінних режимах: тиск – 0,7 МПа; температура – 150, 160, 170 °С; тривалість – 0,5–1,5 хв/мм, витрата плівки – 1–4 шари.

- Han and Lee [8] досліджували адгезійні властивості фанери із лущеного шпону підвищеної вологості (11,4 та 19,6 %). Електронна мікроскопія показала, що полімерна плівка склеює шпон шляхом проникнення в порожнини і клітини шпону без погіршення міцності на зріз.

- У роботі [9] досліджували шпон різної вологості (0, 6, 12, 18, 24 %) та плівки ПЕВГ товщиною 0,06 мм. Режим пресування: тиск – 0,1–1,3 МПа; температура – 140–180 °С; тривалість – 6,4 хв; витрата плівки – 61,6–308 г/м².

- Bekhta et al. [10, 21–26] використовували шпон тополі, берези, бука, граба та первинний/вторинний ПЕНГ товщиною 50, 100 та 150 мкм. Режим

пресування: тиск – 1,4 МПа, температура – 160 °С, тривалість – 4,5 хв. Встановлено, що порода деревини визначає ефективність склеювання.

- Fang et al. [11] виготовляли тополеву фанеру із лущеного шпону вологості 6–8 % із плівкою ПЕВГ (витрата 61,6–246 г/м²). Режим пресування: тиск – 1 МПа, температура – 160 °С, тривалість – 8 хв.

- У дослідженні [12] застосовували евкаліптовий шпон (вологість 8–9 %) та плівку ПЕВГ товщиною 0,06 мм. Режим пресування: тиск – 0,7–1,3 МПа; температура – 140–180 °С; тривалість – 50–90 с/мм. Фанера нетоксична та придатна для меблевого виробництва.

- Lustosa et al. [13] використовували шпон породи амескла та плівку ПЕВГ; пресування: тиск – 1 Н/мм²; температура – 100–140 °С; тривалість – 10–15 хв; витрата полімеру – 150–350 г/м².

- Бехта П.А. та Кусняк І.І. [14] виготовляли фанеру із березового шпону та плівки ПЕНГ: тиск – 1,8 МПа, температура – 140–180 °С, тривалість – 6,5 хв, витрата плівки – 130–190 г/м². Міцність на зріз – 1,46–1,69 МПа.

- Bekhta et al. [15] досліджували фанеру із шпону бука, берези та ялини, склеєну LDPE (ПЕНГ), CoPA та CoPE; пресування – тиск 0,8 Н/мм², температура – 150 °С, тривалість – 5 хв. Міцність на зріз – 1,18–2,51 МПа.

Дослідження показують, що фанера, склеєна термопластичними плівками ПЕНГ і ПЕВГ, відповідає європейському стандарту EN 314-2 для фанери першого класу. Використання термопластичних плівок забезпечує (табл. 1.1):

- екологічність матеріалу,
- підвищену міцність на зріз,
- оптимальні умови пресування та енергозбереження на виробництві.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз умов виготовлення фанери, склесної термопластичними плівками

№ з/п	Автори	Порода деревини	Вологість, %	Вид плівки	Товщина плівки, мм	Режим пресування			Витрата, г/м ²	Міцність на зріз, МПа
						Тиск, МПа	Температура, °С	Тривалість, хв		
1	Bekhta and Sedliačik [5]	Вільха	6	ПЕВГ	0,14	0,8; 1,2; 1,6	140; 160; 180	1, 2, 3, 5 хв	–	0,74–2,38
2	Fang et.al. [7]	Тополя	4–6	ПЕВГ	0,05	0,7	150–180	0,5–1,5 хв/мм	1–4 шари	0,8–1,15
3	Han and Lee [8]	Сосна	11,4; 19,6	ПЕВГ	–	–	–	–	–	1,5
4	Chang et.al. [9]	Тополя	6, 12, 18, 24	ПЕВГ	0,06	0,1–1,3	140–180	6,4 хв	61,6–308	0,8–1,5
5	Bekhta et al. [10, 21-26]	Тополя, береза, бук, граб	6	ПЕНГ	0,05-0,15	1,4	160	4,5 хв	-	0,9–1,8
6	Fang et al. [11]	Тополя	6–8	ПЕВГ	–	1	160	8 хв	61,6–246	1,46
7	Song et.al.[12]	Евкалипт	8–9	ПЕВГ	0,06	0,7–1,3	140–180	50–90 с/мм	–	–
8	Lustosa et al. [13]	Амескла	–	ПЕВГ	–	1	100–140	10–15 хв	150–350	2,32
9	Бехта П.А., Кусняк І.І. [14]	Береза	–	ПЕНГ	–	1,8	140–180	6,5 хв	130–190	1,46–1,69
10	Bekhta et al. [15]	Бук, Береза, Ялина	–	ПЕНГ / СоРА / СоРЕ	–	0,8	150	5 хв	–	1,18–2,51

Примітка: ПЕВГ – поліетилен високої густини; ПЕНГ – поліетилен низької густини; СоРА – сополімер нейлону 6; СоРЕ – співполімер етилену

1.3. Аналіз способів підвищення адгезійних властивостей між шпоном та термопластичною плівкою

Підвищення адгезійної міцності між шпоном і термопластичною плівкою є одним із ключових чинників забезпечення міцності та довговічності деревинних композитів. Ефективність з'єднання визначається переважно станом поверхні деревини та полімеру, а також їх здатністю до формування хімічних, фізико-хімічних та механічних зв'язків. Підготовка поверхонь до склеювання може здійснюватися механічними, фізичними та хімічними методами, дія яких у більшості випадків є комплексною [27] (рис. 1.2).

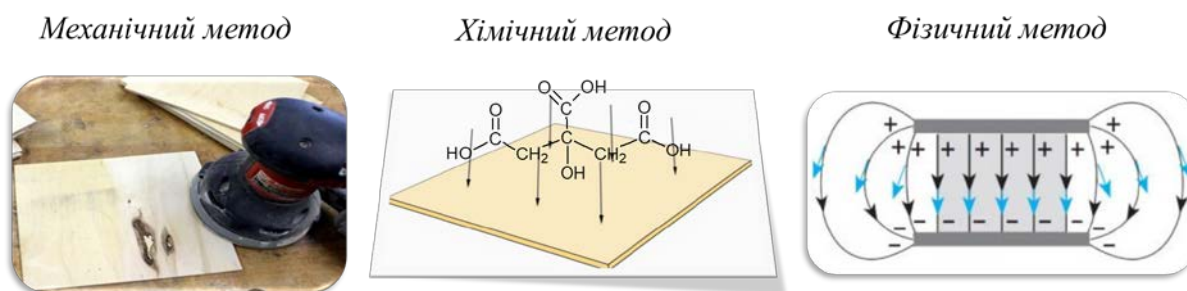


Рис. 1.2 – Методи підвищення адгезійної міцності клейового з'єднання

Механічні методи модифікування поверхні

Механічна підготовка деревини включає шліфування шпону, яке сприяє порушенню поверхневого шару, збільшенню мікрошорсткості та формуванню активних центрів. Такі зміни забезпечують збільшення площі реального контакту між шпоном і термопластичною плівкою, що позитивно впливає на адгезійну взаємодію. Механічні методи є базовими, проте їх ефективність часто є недостатньою без подальшої хімічної або фізичної модифікації.

Хімічні методи підвищення адгезії

Хімічне модифікування поверхні є одним із найбільш результативних підходів до підвищення адгезії, оскільки дозволяє змінювати поверхневу

енергію, полярність та реакційну здатність як деревини, так і полімерної плівки. Обробка здійснюється за допомогою речовин, здатних вступати в реакції з функціональними групами деревинних компонентів або з полімерними ланцюгами термопластів [6–9, 28, 29].

Серед найефективніших модифікувальних речовин, що застосовуються для обробки шпону, виділяють:

- малеїновий ангідрид [6, 18, 19];
- полімери, модифіковані малеїновим ангідридом і хлором [20];
- силанові сполуки, зокрема вінілтриметоксисилан (А-171) [16];
- фталевий ангідрид, у-амінопропілтриметоксисилан, дихлордиетилсилан [17];
- лимонну кислоту та її похідні [30–34].

Дослідження Fang et al. [16] показало, що обробка шпону алкоксисиланами сприяє утворенню ковалентних зв'язків між поверхнею деревини та силанами, що підтверджено за допомогою FTIR, XPS та аналізу змочуваності. Такі зв'язки підвищують міцність при склеюванні та водостійкість композитів. Модифікатори, що містять атоми азоту, додатково змінюють електронно-донорні та електронно-акцепторні властивості поверхні, що також сприяє підсиленню адгезії.

Водночас встановлено, що використання дихлордиетилсилану, фталевого ангідриду та малеїнового поліпропілену не забезпечує суттєвого підвищення міцності з'єднання, оскільки результати були аналогічними до зразків без обробки [17].

Використання лимонної кислоти як модифікатора поверхні шпону

Окремий напрям досліджень стосується застосування розчину лимонної кислоти як хімічного модифікатора для деревини. Лимонна кислота широко використовується як зв'язуюче у виробництві деревинно-композиційних матеріалів (СП, ВП, фанери, LVL) [30–34], однак її

застосування для склеювання плоских поверхонь шпону залишається недостатньо вивченим [31–33].

Zhao et al. [32] визначили оптимальні режими пресування фанери, виготовленої з використанням клею на основі лимонної кислоти. Найвищі показники міцності у вологому стані були досягнуті за температури пресування 190 °C, тоді як за 130–150 °C міцність залишалася недостатньою через неповне затвердіння клею.

Sun et al. [33] синтезували клейову композицію на основі лимонної кислоти та сахарози й встановили, що збільшення частки кислоти у складі клею сприяє зростанню міцності фанери на зріз. Найвищі значення отримано для складу 75 % лимонної кислоти та 25 % сахарози.

Umamura et al. [34] встановили, що між карбоксильними групами лимонної кислоти та гідроксильними групами деревини утворюються складнофірні зв'язки, що забезпечує значне підвищення адгезії. Menezzi et al. [31] підтвердили, що лимонна кислота вступає в реакцію з лігніном та вуглеводними компонентами шпону, формуючи міцні етерні структури.

Фізичні методи активації поверхні термопластичних плівок

Фізичні методи передбачають вплив на термопластичну плівку електричним полем або електричним розрядом. Унаслідок такої обробки на поверхні полімеру утворюються пероксидні радикали, які здатні вступати у хімічні взаємодії з функціональними групами деревини. Це забезпечує підвищення полярності та покращення змочуваності поверхні, що є важливим чинником для формування міцного з'єднання з деревиною.

За результатами наукових досліджень було встановлено, що хімічний метод модифікування найкраще впливає на покращення показників міцності деревинних композитів. Межа міцності на зріз фанери склеєної з модифікованого шпону різними хімічними речовинами та термопластичних полімерів сягає від 1,0 до 3,9 МПа.

1.4. Вплив параметрів пресування на фізичні властивості фанери

Якість фанери і фанерної продукції характеризується в основному фізико-механічними властивостями, які регламентуються відповідними стандартами і технічними умовами. Фізичні властивості фанери і фанерної продукції залежать від породи і властивостей деревини, з якої вони виготовлені. Окрім цього, на ці властивості впливають вид застосовуваного клею, режими склеювання, товщина шпону і багато інших факторів [5, 35-38].

Основні фізичні властивості фанери: щільність, водо- і вологопоглинання, вологість, теплоємність, теплопровідність, звукопровідність.

Щільність фанери залежить від товщини, кількості шарів шпону, породи деревини, способу і режиму склеювання. Щільність фанери на 18–25 % більша, ніж щільність масивної деревини. Це пояснюється тим, що фанера склеюється в гарячому стані під тиском, внаслідок чого шари шпону, особливо поверхневі, ущільнюються. З таких самих міркувань щільність фанери залежить від її товщини. Ущільнення деревини шпону більше за гарячого сухого способу склеювання, ніж за холодного.

Тонка фанера під тиском ущільнюється більше, ніж товста, оскільки відносно значення пластичних деформацій тонкої фанери більше. Підвищення вологи шпону призводить до збільшення ступеня його ущільнення під тиском, а отже, і щільності фанери. Чим тонкіший шпон, який застосовується для склеювання фанери однакової товщини, тим більше вологи вноситься в пакет з клеєм, тим щільніша фанера. Щільність фанери зменшується зі збільшенням загальної товщини фанери, незважаючи на збільшення кількості шарів. Тобто пластичність шпону суттєвіше впливає на щільність фанери порівняно з наявністю в ній сухих речовин клею (густина клею перебільшує щільність деревини). На щільність фанери впливає кількість сухих речовин у клеї. Оскільки щільність сухих речовин більша за щільність шпону, то зі збільшенням кількості шарів фанери її щільність зростає. Характерно, що щільність зменшується зі збільшенням загальної

товщини фанери, незважаючи на збільшення кількості шарів. Отже, фактор пластичності шпону має вирішальний вплив на щільність фанери порівняно з фактором кількості в ній сухих речовин клею.

Щільність фанери залежить від способу і режиму склеювання. Зі зменшенням тиску і температури при склеюванні щільність зменшується. Тому щільність фанери холодного склеювання, яка пресується без ущільнення деревини, менша за щільність фанери гарячого склеювання, опресування якої досягає 5–13 %.

Вологість фанери залежить від технології її виготовлення та умов експлуатації і визначає практично всі фізико-механічні показники фанери.

Водопоглинання і об'ємне набрякання фанери залежать від породи деревини і кількості шарів фанери. Буковий шпон, наприклад, вбирає більше води, ніж березовий. За однакової товщини фанера з більшою кількістю шарів має менше водопоглинання. Збільшення вологості зменшує механічні показники фанери. Для порівняння механічних властивостей різних видів фанери вологість її приймають рівною 12 %.

Вологопоглинання фанери, тобто здатність поглинати вологу з навколишнього повітря, залежить від відносної вологості повітря, температури. Фанеру зберігають за відносної вологості повітря 55–60 %, температурі 20 °С.

Теплопровідність фанери залежить від породи і ступеня ущільнення деревини, напрямку теплопередачі в листі, температури і вологості. Через наявність в шпоні значної кількості тріщин, утворених під час луцення, теплопровідність звичайної фанери за товщиною є трохи меншою за теплопровідність деревини. Треба зазначити, що значне ущільнення шпону під час пресування, а також наявність великої кількості клею, який заповнює пори і тріщини, збільшують теплопровідність фанери.

Теплоємність фанери, так само як і масивної деревини, залежить від вологості і температури, а також від вмісту клейових речовин. Чим більше

введено клею в пакет і чим більша кількість шарів на 1 см товщини фанери, тим більше її теплоємність відрізняється від теплоємності деревини.

Звукопровідність фанери залежить від породи деревини і напрямку проходження звукових хвиль. Зокрема, швидкість проходження звуку в деревині сосни вздовж волокон 5030 м/с, а берези – 3625 м/с. Тоді як в тангентальному напрямку звук розповсюджується зі швидкістю відповідно 850 і 1535 м/с. Однак у всіх випадках швидкість проходження звуку вздовж волокон значно більша, ніж впоперек. Тому фанера має високу здатність до поглинання звуку. До того ж, тонка фанера стишує звук краще, ніж товста. Фанера досить добрий матеріал для опорядження приміщень, в яких вимагаються високі акустичні властивості.

За результатами наукових досліджень було встановлено, що температура, тиск і час пресування суттєво впливають на властивості фанери, склеєної з листів шпону термопластичними плівками [5, 39-65]. У роботах [41-44] зазначено, що збільшення температури пресування від 140 до 180 °С та витрати термопластичної плівки від 130 до 190 г/м² впливають на зменшення щільності фанери, тоді як вологість фанери зменшується від 5,29% до 3,97%. Водночас, істотний вплив на водопоглинання та набрякання за товщиною зразків фанери після витримки у воді впродовж 24 год чинить температура пресування.

Fang et al. [7] виготовляли фанеру, склеєну ПЕВГ за різних температур – 150 °С, 160 °С, 170 °С. Було встановлено, що температура пресування помітно впливає на проникнення клейової речовини і утворення зв'язків. Механічне блокування, що спостерігалось за допомогою скануючої електронної мікроскопії, утворюється між неполярним пластиком і пористою тополею. Lustosa et al. [13] для виробництва термопластичної фанери використовували температуру пресування – 100, 120, 140 °С; тиск – 1 Н/мм²; тривалість – 10–15 хв. Низькі температури не сприяли адекватному

плавленню ПЕ. За температури 140 °С, тривалості 15 хв спостерігався найкращий результат.

Bekhta and Sedliačik [5] досліджували вплив режимних параметрів гарячого пресування: температури (140, 160 та 180 °С), тиску (0,8, 1,2 та 1,6 МПа), тривалості (1, 2, 3, і 5 хв) і виду клеїв на фізико-механічні властивості фанери. Оптимальними умовами для склеювання фанери термопластичною плівкою HDPE є температура пресування 160 °С, тиск пресування 0,8 МПа та тривалість пресування 3 хв.

Song et al. [12] виготовляли фанеру з лущеного евкаліптового шпону та плівки ПЕВГ. Режим склеювання: температура – 140, 160, 180 °С; тиск – 0,7; 1,0; 1,3 МПа; тривалість – 50, 70, 90 с/мм. Було знайдено оптимальний режим виготовлення фанери: температура – 160 °С; тиск – 1,3 МПа; тривалість – 50 с/мм. Song et al. [19] опрацьовано можливість склеювання листів евкаліптового шпону ПП плівкою. Режим гарячого склеювання: температура – 165, 175, 180, 185, 195 °С; тиск – 0,9; 1,1; 1,3 МПа; тривалість – 40, 55, 70 с/мм. Витрата плівки – 100, 150, 200 г/м². Результати показали, що оптимальними умовами для виготовлення фанери із задовільними властивостями є: температура – 180 °С, тиск – 0,9 МПа, тривалість – 70 с/мм.

Щодо виготовлення фанери, склеєної з листів модифікованого шпону термопластичною плівкою, то режимні параметри також мають важливе значення. Температура пресування суттєво впливає не лише на текучість полімеру, але й на хід хімічних реакцій між деревиною, модифікувальною речовиною та полімером.

В продовження дослідження Sun et al. [33], Zhao та ін. [32] досліджували оптимальну тривалість та температуру пресування, а також витрату в'язучого для виробництва фанери, склеєної СА/сахарозою, синтезованої Sun et al. [33]. Повідомлялося, що температура пресування понад 170 °С надає певну міцність сухого з'єднання, тоді як 190 °С забезпечує найкраще затвердіння клею. Фанера, склеєна за температури 190 °С, має

міцність на зсув у мокрому стані, яка перевершує стандарт GB/T 9846-2015 (Китай). Фанера, спресована за температури 130 і 150 °С, не продемонструвала міцності зчеплення, що означає, що клей СА/сахароза погано затвердіває за низької температури. Тривалість пресування також відіграє важливу роль у затвердінні адгезиву СА/сахарози. Тривалість 7 хв - найоптимальніший параметр.

Таблиця 1.2 – Фізичні властивості фанери склесної термопластичним плівками [49]

Показник	Вид полімеру						Вимоги згідно EN 314-2
	ПЕВГ [21]	ПЕВГ [23]	ПЕВГ [22]	ПЕВГ [72]	ПЕНГ [49]	ПП [29]	
Порода деревини	амескла	тополя	тополя	вільха	береза	евкаліпт	>1,0
Водопоглинання за 24 год., %	43,82	81,7	60,0	51,38	41,0	-	
Набрякання за товщиною за 24 год., %	5,51	7,65	8,0	8,82	10,8	8,2	

1.5. Висновки

Потреба у виробництві фанери в Україні залишається стабільно високою та зростає у зв'язку з активним розвитком меблевої, будівельної та транспортної галузей. В умовах конкуренції та необхідності підвищення екологічних стандартів перспективним напрямом є застосування термопластичних полімерних плівок як альтернативи традиційним клеям. Це дає змогу зменшити кількість формальдегідних викидів, підвищити довговічність та водостійкість готової фанери.

Покращення адгезійних властивостей фанери можливе завдяки попередній підготовці деревини різними фізичними, хімічними і механічними методами — зокрема, шліфуванням, плазмовою обробкою, модифікуванням поверхні шпону або полімерної плівки. Такі технології

дозволяють підвищити міцність клейових з'єднань та забезпечити рівномірне змочування поверхні полімером.

Важливим технологічним чинником залишається температура пресування, яка істотно впливає на фізико-механічні показники фанери. Оптимальні температурні режими забезпечують достатню текучість термопластичної плівки, якісне з'єднання шарів шпону та максимальну міцність під час статичного згинання. Надмірно висока температура може призвести до деструкції та зниження міцності деревини, тоді як занизька – до неповного плавлення плівки та слабкої адгезії.

Отже, розвиток виробництва фанери в Україні доцільно спрямовувати на інтеграцію екологічних полімерних технологій, удосконалення методів підготовки поверхонь та оптимізацію режимів пресування. Це дозволить отримати конкурентоспроможні матеріали з покращеними експлуатаційними властивостями та зменшеним впливом на довкілля.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення фанери.

Предметом дослідження є вплив температури пресування на фізичні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної первинною плівкою ПЕНГ.

Мета роботи – з'ясувати фізичні властивості фанери, склеєної з хімічно модифікованого шпону первинною термопластичною плівкою ПЕНГ за різної концентрації розчину та температури пресування. Для досягнення поставленої мети було сформовано та вирішено наступні завдання:

3 Дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти за різної температури пресування на фізичні властивості фанери.

4 Дослідити вплив температури пресування на фізичні властивості фанери.

Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З огляду на результати теоретичного аналізу можливостей склеювання шпону первинними термопластичними полімерами та впливу температури пресування на процес склеювання пакетів з модифікованого шпону, встановлено потребу в додаткових експериментальних дослідженнях. Очікується, що отримані дані дозволять визначити залежність фізичних властивостей фанери від концентрації лимонної кислоти та температури пресування, що надалі може бути використано для оптимізації процесу склеювання.

2.1. Матеріали та реактиви

Для склеювання пакетів з модифікованого шпону плівкою ПЕНГ використовувалися наступні матеріали:

- луцений березовий шпон розміром 300×300×1,55 мм, вологістю $6 \pm 2\%$;
- первинна плівка ПЕНГ (ISO 14024);
- лимонна кислота – $C_6H_8O_7$;
- дистильована вода.

Поверхнєве модифікування шпону проводили розчином лимонної кислоти, фізико-хімічні властивості якої наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості лимонної кислоти

№з/п	Найменування показника	Норма
1	Масова частка лимонної кислоти, % не менше не більше	99,5 100,5
2	Масова частка води, % не менше не більше	7,5 8,8
3	Масова частка сульфатів %	0,015
4	Масова частка оксалатів, %	0,01

Для склеювання листів березового шпону брали первинну плівку ПЕНГ товщиною 100 мкм, фізико-механічні властивості якої наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізико-хімічні властивості плівок ПЕНГ [40]

№з/п	Найменування показника	Норма для плівок ПЕНГ
1	2	3
1	Товщина, мкм	15–500
2	Густина за 20 °С, г/см ³	0,919–0,929
3	Температура плавлення, °С	108–115
4	Температура початку деформації, °С	90–100
5	Морозостійкість, °С	–70
6	Робочий інтервал температур, °С	від –60 до + 80
7	Модуль пружності під час розтягування, МПа	147–294
8	Межа текучості під час розтягування, МПа	8,8–11,9
9	Водопоглинання за 24 год за 20 °С, %	0,01
10	Діелектричне проникнення за 10 ⁶ Гц, 20 °С	2,2
11	Тангенс кута діелектричних втрат за 10 ⁶ Гц, 20 °С	0,0003
12	Питомий об'ємний електричний опір за 20 °С, Ом·м	1·10 ⁻¹⁸ –1·10 ⁻¹⁹

2.2. Вимірювальні прилади та обладнання

Для виконання експериментальних досліджень були використані наступні прилади та обладнання:

- лінійка металева;
- штангенциркуль;
- індикатор годинникового типу;
- ножиці;
- вологомір НМВ-WS1;
- вага електронна AD 2000 (точність вимірювання 0,01 г);
- лабораторний гідравлічний прес фірми "Хомко";
- прес для холодного пресування ПММ-125;
- круглопилковий верстат;
- фільтрувальний папір;
- стакан мірний (об'єм 200 мл);
- скляна паличка;
- розпилювач для розчину;
- персональний комп'ютер для обробки результатів досліджень.

2.3. Методика модифікування поверхні шпону

Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторії кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу НЛТУ України.

Хімічний метод впливу на поверхню шпону є одним із найефективніших шляхів підвищення адгезії (пункт 1.3), що підтверджується результатами численних досліджень [6–9, 28, 29]. Суть хімічного модифікування полягає в обробці поверхні шпону різними реагентами, які сприяють покращенню адгезійної міцності клейового з'єднання.

Для здійснення хімічної модифікації було використано розчини лимонної кислоти різної концентрації – 5, 15 і 25 % витратою 50 г/м². Наважка кислоти становила 4,5 г. Приготований розчин заданої концентрації наносили на поверхню шпону за допомогою розпилювача, забезпечуючи рівномірне покриття всієї площі (рис. 2.1).

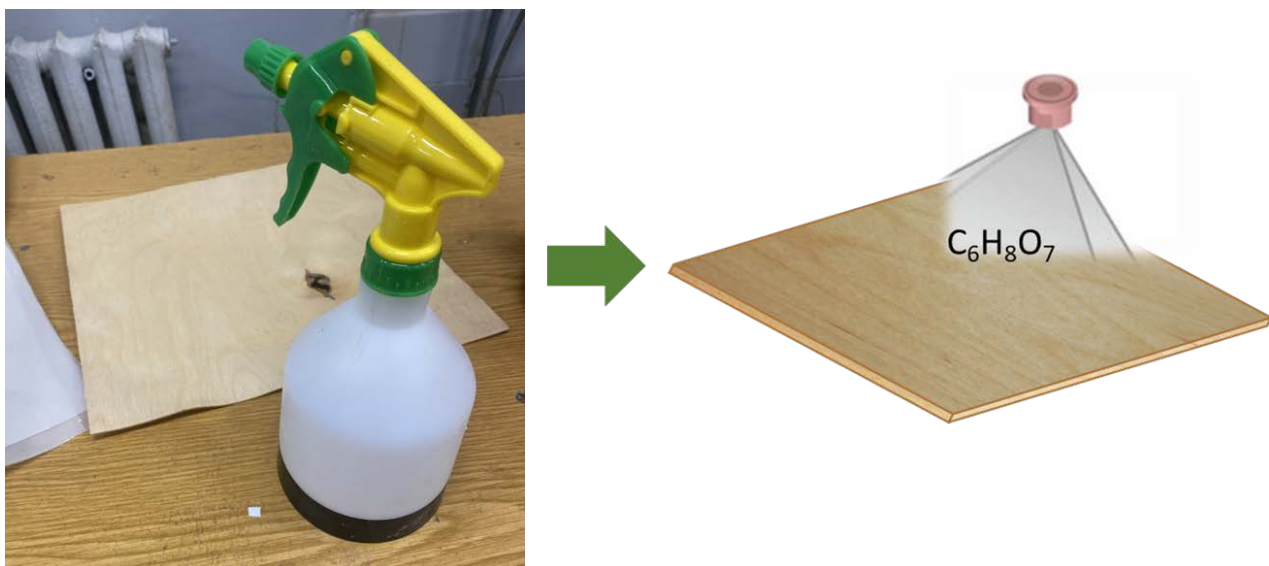


Рис. 2.1 – Нанесення модифікувального розчину на поверхню шпону

Виготовляли тришарову фанеру. Розчин лимонної кислоти наносили з двох сторін для середнього шару шпону, і з одної для верхнього і нижнього.

Після нанесення модифікувальної речовини на поверхню листа шпону здійснювалось сушіння у сушильній шафі за температури 102 °С до вологості $6 \pm 2 \%$ (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Сушіння шпону у сушильній шафі SNOL 67/350

Вологість шпону постійно контролювали за допомогою вологоміра (рис. 2.3). Це дуже важливо під час склеювання пакетів термопластичними плівками, оскільки підвищена вологість шпону блокуватиме проникнення в'язкотекучого полімеру в структуру деревини, що викликатиме непроклеювання листів шпону між собою.



Рис. 2.3 – Визначення вологості луценого шпону вологоміром HMB-WS1

Після сушіння шпону замірювали його товщину індикатором годинникового типу (рис. 2.4). Це необхідно, що визначити в подальшому величину спресування фанери.



Рис. 2.4 – Момент визначення товщини шпону

2.4. Методика досліджень фізичних властивостей фанери

2.4.1. Виготовлення фанери

Пакети березового шпону склеювали термомпластичною плівкою ПЕНГ замість традиційних термореактивних карбамідоформальдегідних та фенолоформальдегідних клеїв. Характеристика плівки наведена в табл. 2.2. Оскільки для проведення експериментальних досліджень плівка була у вигляді рукава, то перед формуванням пакетів шпону її розкрюювали на форматні листи розміром 300×300 мм (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Розкрюювання плівки ПЕНГ

Наступним етапом було формування пакетів шпону. Для цього між листами модифікованого березового шпону укладали один лист плівки ПЕНГ. Пакет формували з дотриманням правил симетрії між суміжними листами шпону та вкладанням лівої сторони напівфабрикати в середину. Загалом сформований пакет шпону складався з трьох листів модифікованого березового шпону та двох термомпластичних плівок ПЕНГ, розміри яких відповідали розмірам шпону. Схема формування пакетів шпону наведена на рис. 2.6.



Листи шпону та плівки



Пакет шпону

Рис. 2.6 – Схема формування пакета шпону

Після формування пакети шпону піддавали пресуванню в гідравлічному пресі фірми “Хомко” гарячим способом. (рис. 2.7).



Рис. 2.7 – Робочий момент гарячого пресування пакета шпону в лабораторному пресі “Хомко”

Умови склеювання пакетів шпону наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.4 – Планування експериментальних досліджень

Назва клею	Умови виробництва фанери				
	Концентрація розчину, %	Витрата розчину, г/м ²	Температура пресування, °С	Тиск пресування, МПа	Час пресування, хв
ПЕНГ	5, 15, 25	50,	140, 160, 180	1,4	4,5

Завершальним етапом виготовлення фанери було холодне пресування фанери за кімнатної температури 20 ± 2 °С впродовж 5 хв. Дана операція необхідна умова для завершення процесу затвердіння термопластичного полімеру та зменшення короблення фанери. (рис. 2.8).



Рис. 2.8 – Лабораторний прес для холодного пресування “ ПММ-125”

Після холодного пресування листи фанери кондиціонували 7 діб ($T=20\pm 2$ °С, $W=65\pm 5$ %).

Фізичні властивості фанери, склеєної з модифікованого шпону первинною термопластичною плівкою, порівнювали з властивостями фанери склеєної з немодифікованого шпону плівкою ПЕНГ.

Після кондиціювання, з кожного листа фанери вирізали зразки для визначення наступних фізичних показників [68-70] (рис. 2.9):

- щільності (EN 323);
- водопоглинання після витримки у воді на 24 год (EN 317);
- набрякання за товщиною після витримки у воді на 24 год (EN 317).



Рис. 2.9 – Підготовка зрізів фанери до випробувань

2.4.2. Випробування і визначення фізичних властивостей фанери

Щільність фанери

Щільність фанери – це маса матеріалу, віднесена до його об'єму ($\text{кг}/\text{м}^3$), що визначає ступінь ущільнення деревинної структури шпону та шару клею. На щільність впливають порода деревини, кількість шарів шпону, вид клею, вологість шпону та параметри гарячого пресування (температура, тиск, тривалість). Вимірювання щільності фанери проводили згідно ДСТУ EN 323.

Даний показник визначали шляхом зважування взірців фанери розміром 50×50 мм з точністю до 0,01 г та замірюванням лінійних розмірів (рис. 2.10).

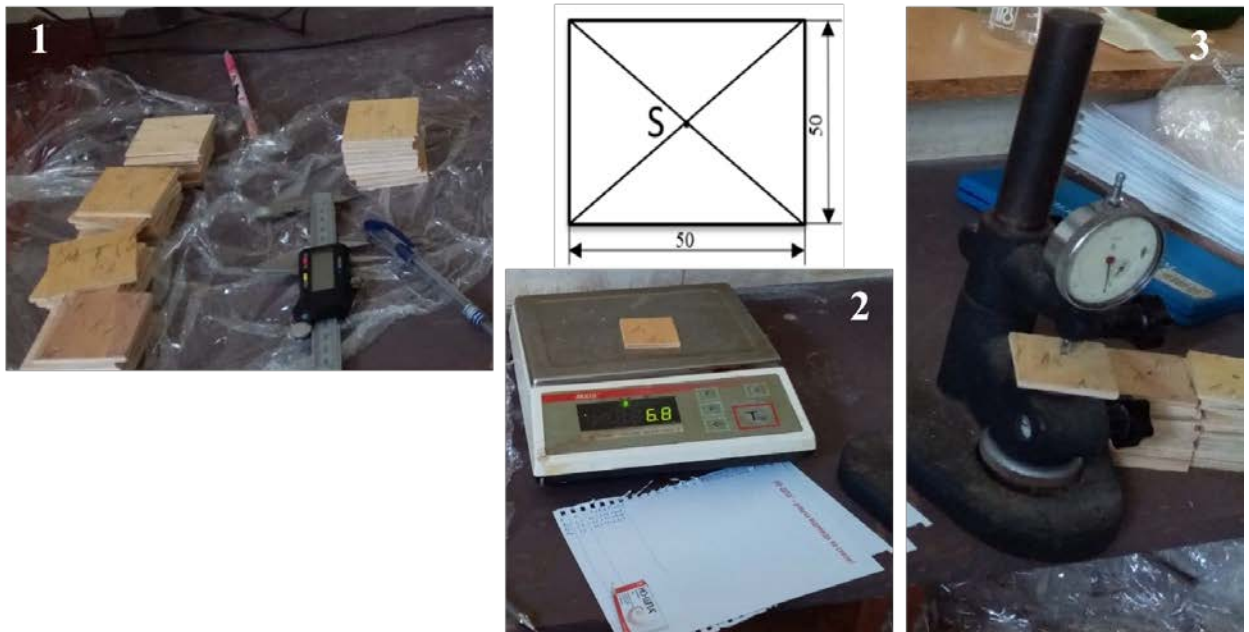


Рис. 2.10. Визначення щільності фанери: 1 – зразки фанери, штангенциркуль; 3 – електронна вага; 4 – індикатор годинникового типу

Товщину зразків фанери вимірювали індикатором годинникового типу в точці перетину ліній. Довжину і ширину зразків вимірювали штангенциркулем в двох місцях паралельно поздовжньому і поперечному краях зразка з точністю до 0,1 мм. Довжину та ширину зразка приймали за середнє арифметичне результатів двох вимірювань.

Щільність фанери визначали з точністю до 1,0 кг /м³ за формулою:

$$\rho_{\phi} = \frac{m}{l \cdot b \cdot S}, \quad (2.1)$$

де m – маса зразка, кг ;

b – ширина зразка, м ;

l – довжина зразка, м ;

S – товщина зразка, м.

Водопоглинання фанери

Водопоглинання – це здатність фанери збільшувати свою масу внаслідок проникнення води у пори деревини та міжклітинний простір під час контакту з водою. Показник визначають як відносний приріст маси після витримання зразків у воді протягом регламентованого часу (зазвичай 24 години). Водопоглинання є індикатором здатності фанери до поглинання води та стійкості її клейових швів. Чим менше водопоглинання, тим вищі експлуатаційні властивості фанери у вологому, зовнішньому або змінному середовищі. Випробування проводять за стандартами ДСТУ EN 317.

Водопоглинання фанери визначали на зразках розміром 50×50 мм на яких попередньо визначали щільність. Зважені зразки з точністю до 0,01 г поміщали у ємкість з водою за кімнатної температури (20 ± 1) °C у вертикальному положенні (рис. 2.11).

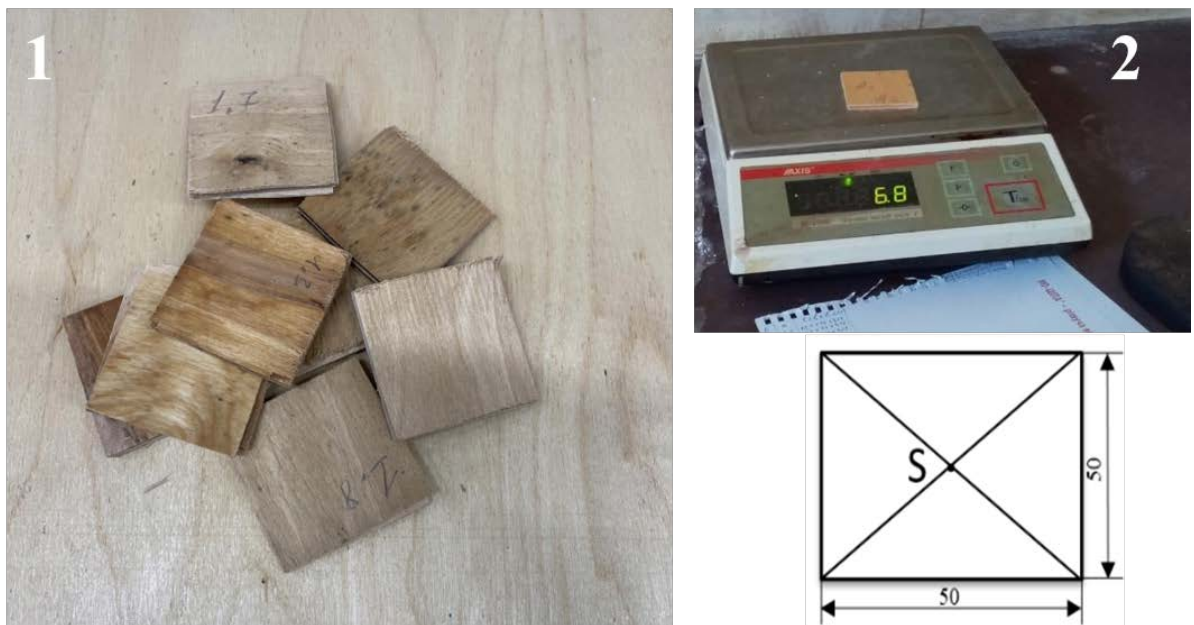


Рис. 2.11. Визначення водопоглинання зразків фанери: 1 – зразки фанери після замочування у воді впродовж 24 год; 2 – електронна вага

Тривалість витримки зразків фанери у воді становила 24 години. Після закінчення часу замочування у воді зразки виймали з води, притирали фільтрувальним папером та зважували.

Показник водопоглинання фанери визначали з точністю до 1 % за формулою:

$$\Delta W_{\text{вод}} = \frac{m - m_2}{m_2} \cdot 100, \quad (2.2)$$

де m_2 – маса зразка до занурення у воду, кг;

m – маса зразка після занурення у воду, кг.

Набрякання фанери за товщиною

Набрякання фанери – це відносне збільшення товщини матеріалу внаслідок об'ємного розширення деревинних волокон під час поглинання води. Набрякання визначають у відсотках як різницю між товщиною сухого зразка та товщиною після водонасичення (найчастіше після 24 годин замочування). Чим менше набрякання, тим стабільніша фанера та краща якість її склеювання. Стандартне визначення виконується згідно з ДСТУ EN 317.

Набрякання фанери за товщиною визначали на тих же зразках розміром 50×50 мм, що і водопоглинання. Зважені зразки з точністю до 0,01 г поміщали у ємкість з водою за кімнатної температури (20 ± 1) °С у вертикальному положенні (рис. 2.12).

Тривалість витримки зразків фанери у воді теж становила 24 години. Після закінчення часу замочування у воді зразки виймали з води, притирали фільтрувальним папером та замірювали товщину.

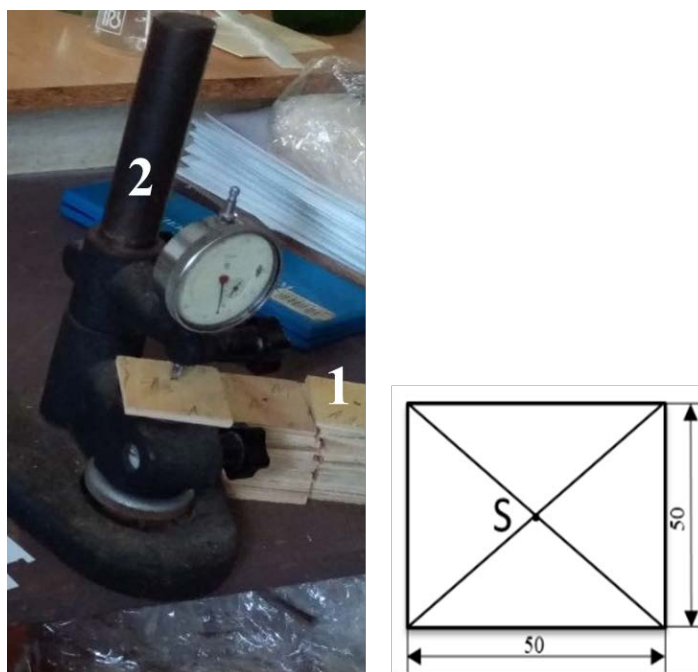


Рис. 2.12. Визначення набрякання зразків фанери за товщиною: 1 – зразки фанери після замочування у воді впродовж 24 год;
2 – індикаторний глибиномір

Набрякання за товщиною визначали з точністю до 1 % за формулою:

$$\Delta t_n = \frac{t - t_1}{t_1} \cdot 100, \quad (2.3)$$

де t_1 – товщина зразка до занурення у воду, мм;

t – товщина зразка після занурення у воду, мм.

2.5. Статистична обробка даних результатів досліджень

Після завершення випробувань була проведена попередня статистична обробка експериментальних даних для прискорення подальших розрахунків і запобігання помилок.

Результат експериментального дослідження розглядається як статистичний набір випадкових величин. Під час статистичної обробки

експериментальних даних визначено наступні основні статистичні параметри [66, 67]:

Середнє арифметичне значення

Найбільш відомим і поширеним у повсякденній практиці варіаційно-статистичним елементом є середнє арифметичне, яке розраховують за формулою:

$$\bar{y} = \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)}{n}, \quad (2.4)$$

де y_1, y_2, \dots, y_n – отримані результати досліджень;

n – число спостережень.

Вибіркова дисперсія та середньоквадратичне відхилення

Середнє арифметичне дає уявлення про середнє значення досліджуваної властивості, але не виражає його мінливості та межі коливань. Тому, крім нього, розраховують величини, що характеризують середню мінливість досліджуваної властивості - середньоквадратичне відхилення та дисперсію. Їх розраховують за формулами:

$$S^2 = \frac{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}{n - 1}, \quad (2.5)$$

де n – число дослідів, що дублюються в кожній серії;

y_i – значення в i -му досліді;

\bar{y} – середнє арифметичне значення.

Середньоквадратичне відхилення

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (2.6)$$

Коефіцієнт варіації

Для оцінки змінюваності (варіації) випадкових величин використовують коефіцієнт варіації, який визначають за формулою:

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \%, \quad (2.7)$$

Даний коефіцієнт характеризує розсіювання випадкової величини відносно середнього значення вибірки, тобто є відносним розсіюванням.

Середньоквадратична похибка середнього значення

Визначивши середнє арифметичне для певної властивості, не можна впевнено стверджувати, що отриманий результат точно характеризує середню величину властивості у всіх інших випадках, що нами не досліджувалися. Тому визначають середньоквадратичну похибку середнього значення за формулою :

$$S_y = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.8)$$

Показник точності досліджу

Подібно до коефіцієнта варіації середня похибка може бути виражена у % до відповідного середнього арифметичного. Отримана величина називається показником точності досліджу (середнього значення) і визначається за формулою:

$$P = \pm \frac{S_y}{\bar{y}} \cdot 100, \% \quad (2.9)$$

Показник точності характеризує надійність результатів досліджень. Чим він менший, тим надійніші результати досліджень. При вивченні фізико-механічних властивостей деревини прийнято, що достатня надійність експериментів буде забезпечена тільки в тому випадку, коли показник точності не перевищує 5 %. Результати статистичної обробки дослідних даних наведені в додатках [A1-A2].

Розділ 3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Мета даного дослідження – з’ясувати фізичні властивості фанери, склеєної з шпону модифікованого розчином лимонної кислоти різної концентрації, первинною термопластичною плівкою ПЕНГ за різної температури пресування.

Для реалізації мети було виготовлено 12 видів фанери:

- 1) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 140 °С;
- 2) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 140 °С;
- 3) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 140 °С;
- 4) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 160 °С;
- 5) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 160 °С;
- 6) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 160 °С;
- 7) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 180 °С;
- 8) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 180 °С;
- 9) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 180 °С;
- 10) з немодифікованого шпону та плівки ПЕНГ за температури пресування 140 °С (*контрольний зразок*);
- 11) з немодифікованого шпону та плівки ПЕНГ за температури пресування 160 °С (*контрольний зразок*);
- 12) з немодифікованого шпону та плівки ПЕНГ за температури пресування 180 °С (*контрольний зразок*).

3.1. Вплив концентрації модифікувального розчину на фізичні властивості фанери

3.1.1. Щільність фанери (EN 323)

Концентрація розчину ЛК помітно впливає на показники щільності фанери, що проглядається на рис. 3.1-3.3.

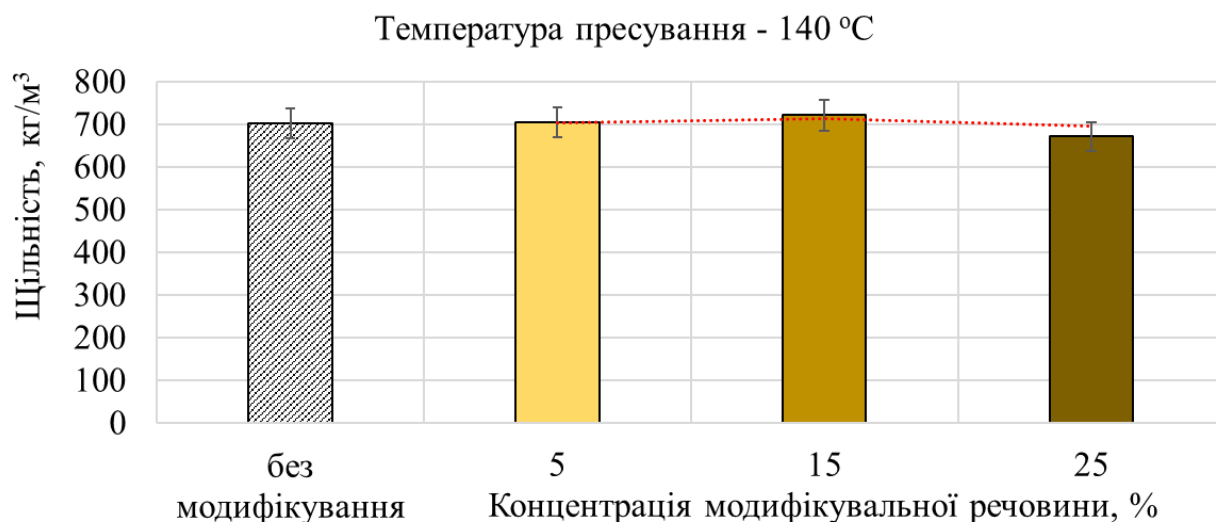


Рис. 3.1 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на щільність фанери за температури пресування 140 °C

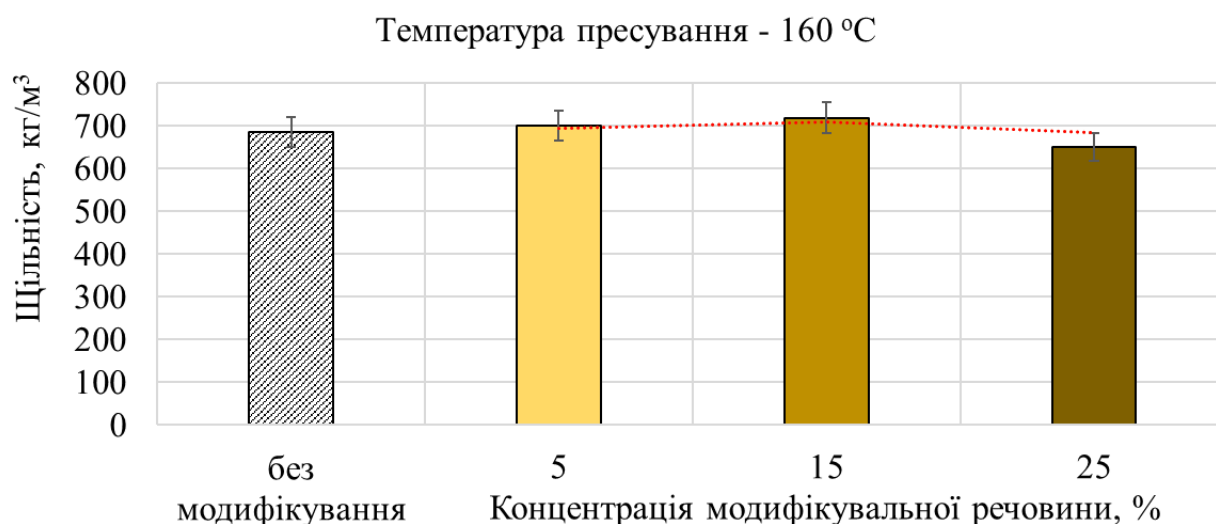


Рис. 3.2 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на щільність фанери за температури пресування 160 °C

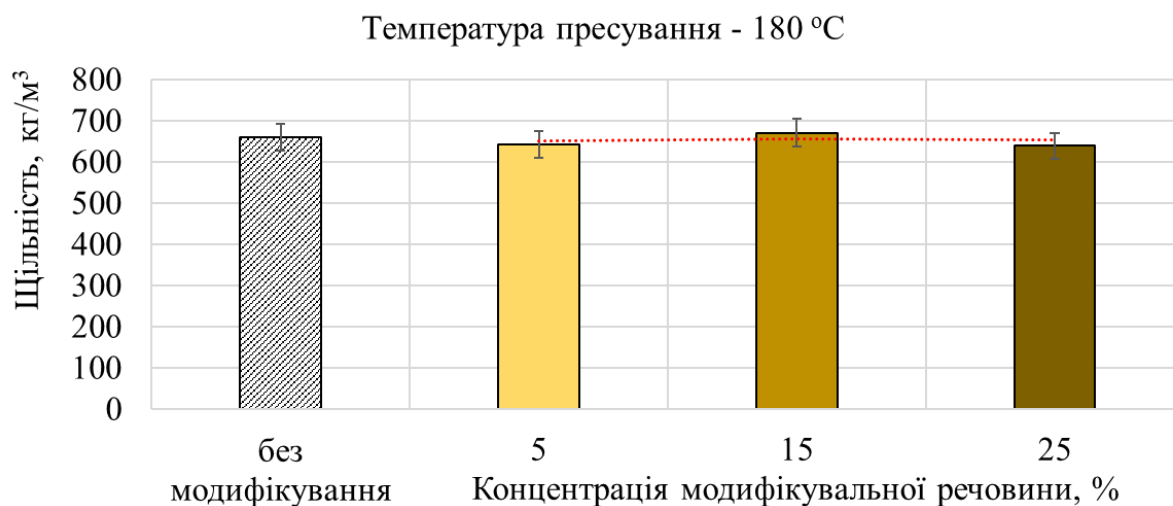


Рис. 3.3 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на щільність фанери за температури пресування 180 °С

Із збільшенням концентрації розчину ЛК від 5 до 15 % середні показники щільності зразків фанери зростають на 2,26 – 4,34 %. Інша залежність спостерігається із подальшим збільшенням концентрації від 15 до 25 %, показники різко падають на 4,65 – 9,56 %. Пояснити таку залежність можна тим, що під час модифікування поверхні шпону розчином ЛК концентрацією від 5 до 15 % та його сушінні, утворюються складні ефірні зв'язки між карбоксильними групами лимонної кислоти і гідроксильними групами на поверхні деревини, що збільшує реакційну здатність шпону до плівки ПЕНГ і тим самим міцність композиту [33]. Проте подальше збільшення концентрації модифікувального розчину до 25 % погіршує показники щільності, що є можливою причиною надмірної кількості речовини, що пришвидшує процес її гідратації та сповільнює затвердіння композиту [22].

Для фанери, склеєної з листів немодифікованого шпону показники щільності дещо нижчі – 659,05 – 702,11 кг/м³, тоді як для фанери, склеєної з модифікованого шпону становлять – 638,55 – 720,40 кг/м³ (рис. 3.4).

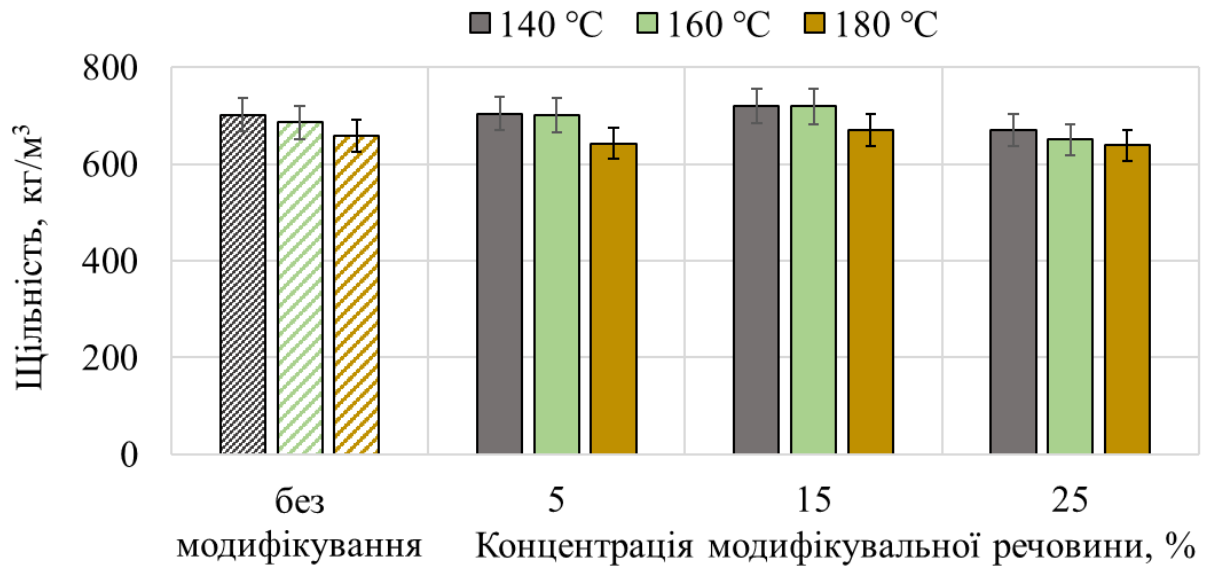


Рис. 3.4 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на щільність фанери за різних температур пресування

Така тенденція зростання показників щільності фанери, склеєної з модифікованого шпону, є наслідком покращення адгезійних властивостей між поверхнею шпону та термопластичним полімером.

3.1.2. Водопоглинання фанери після витримки у воді на 24 год (EN 317)

За результатами експериментальних досліджень виконано статистичний аналіз та побудовано графічні залежності показників водопоглинання фанери після витримки у воді на 24 год від концентрації модифікувальної речовини (рис. 3.5-3.7).

Встановлено, що найбільший вплив на показники водопоглинання фанери має поверхневе модифікування листів шпону розчином ЛК концентрацією 15 %. За цієї концентрації водопоглинання фанери найменше – 37,61 – 47,02 %. Дані показники зменшуються на 11,44 – 17,45 % порівняно з показниками фанери, склеєної з модифікованого шпону концентрацією ЛК 5 %.

Тоді як показники водопоглинання фанери, склеєної модифікованим шпоном розчином ЛК концентрацією 25 % зменшуються лише на 3,22 – 9,46 %.

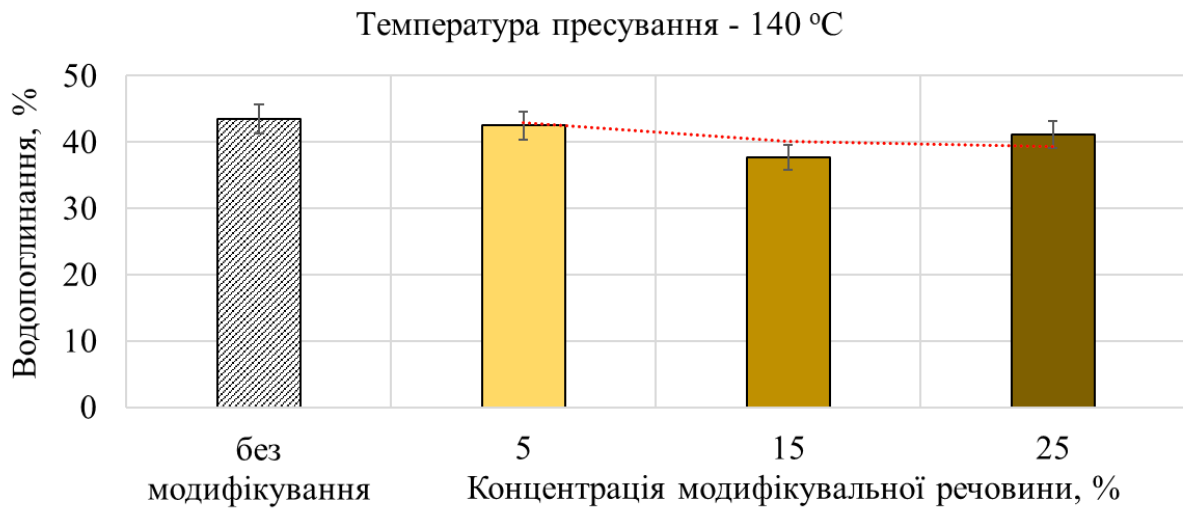


Рис. 3.5 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на водопоглинання фанери за температури пресування 140 °С

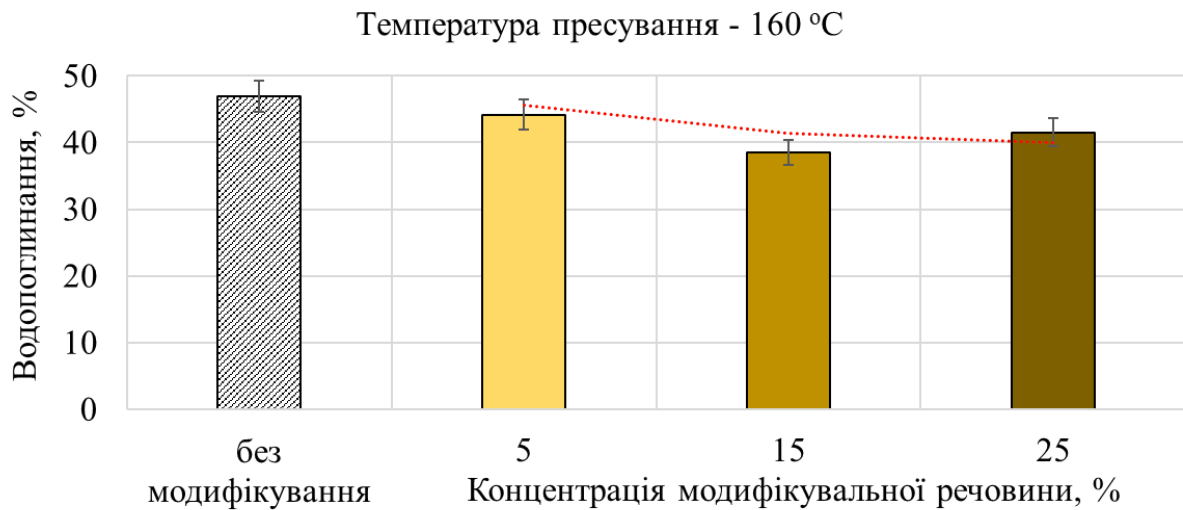


Рис. 3.6 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на водопоглинання фанери за температури пресування 160 °С

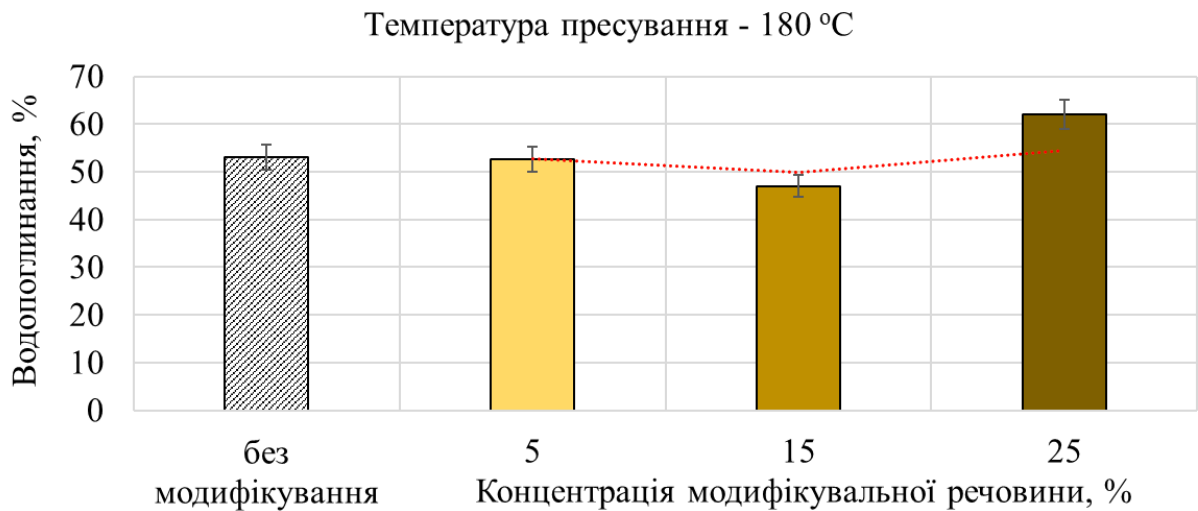


Рис. 3.7 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на водопоглинання фанери за температури пресування 180 °С

Така залежність показників водопоглинання фанери взаємопов'язана із щільністю композиту (див. рис. 3.4). Із збільшенням щільності фанери показники водопоглинання фанери зменшуються.

З'ясовано, що водопоглинання фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином ЛК зменшується на 11,37 – 17,9 % (рис. 3.8).

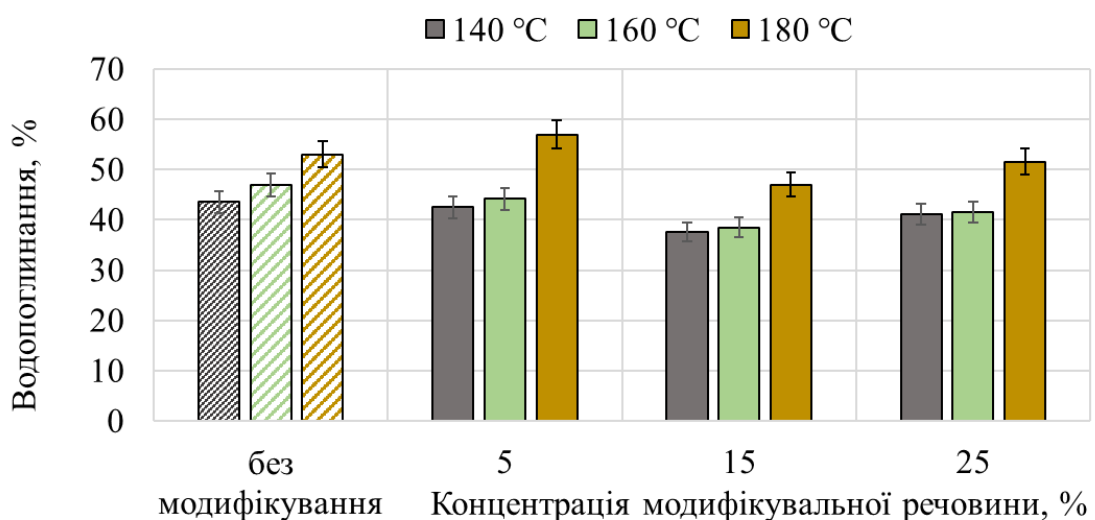


Рис. 3.8 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на водопоглинання фанери за різних температур пресування

Така залежність зрозуміла, адже під час поверхневого модифікування шпону розчином ЛК збільшується адгезійна міцність між деревиною та плівкою, що веде до заповнення клітин та порожнин деревини полімером, який блокує вільне переміщення води по структурі деревини [22, 33, 34].

3.1.3. Набрякання за товщиною після витримки у воді на 24 год (EN 317)

Аналогічні залежності також спостерігаються під час дослідження набрякання за товщиною фанери після витримки у воді впродовж 24 год (рис. 3.9 – 3.11). Із збільшенням концентрації модифікувального розчину ЛК від 5 до 15 % показники набрякання фанери за товщиною зменшуються на 2,06 – 4,64 %, тоді як за концентрації 25 %, навпаки збільшуються на 0,82 – 3,66 %. Збільшення показників набрякання фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 25 %, можливо є наслідком сповільнення процесу затвердіння композиту, що веде до збільшення поглинання води із зовнішніх сторін фанери [22].

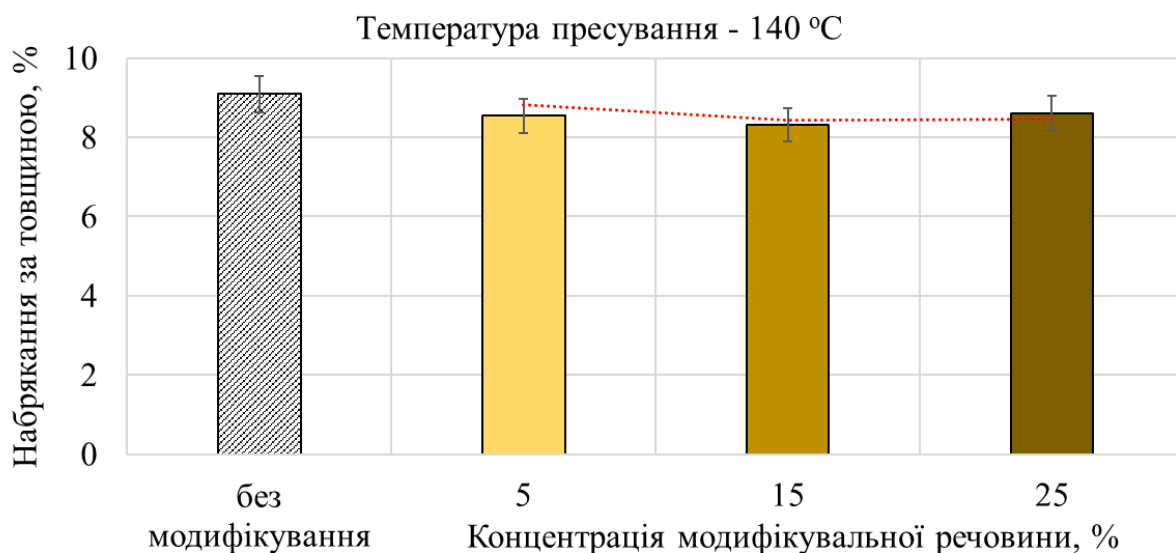


Рис. 3.9 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на набрякання фанери за температури пресування 140 °С

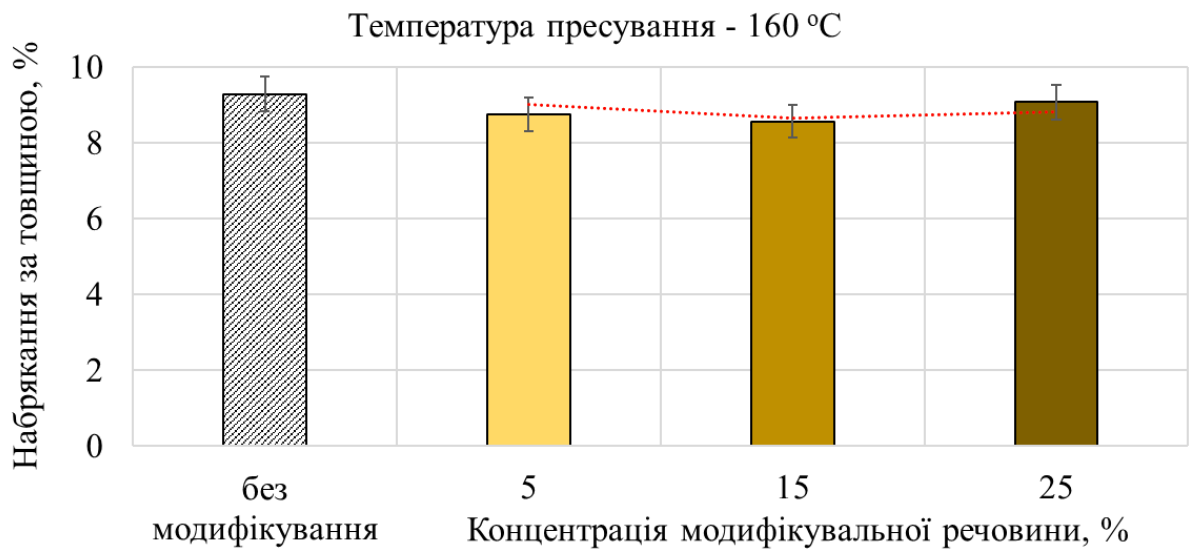


Рис. 3.10 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на набрякання фанери за температури пресування 160 °C

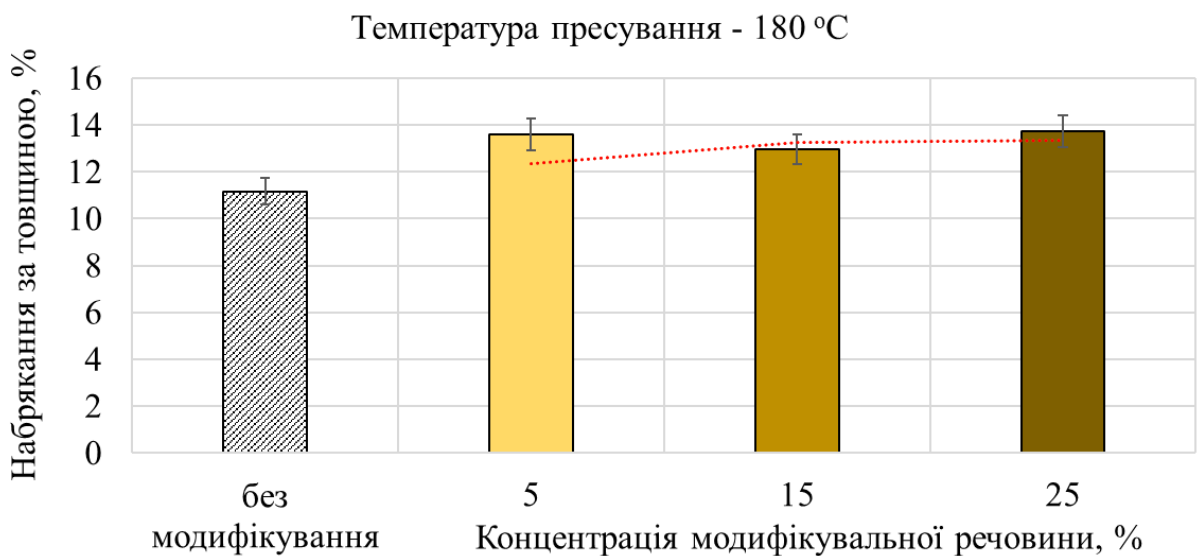


Рис. 3.11 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на набрякання фанери за температури пресування 180 °C

Показники набрякання фанери за товщиною, склеєної з листів модифікованого і немодифікованого шпону також суттєво відрізняються. Поверхнєве модифікування шпону зменшує набрякання фанери (рис. 3.12).

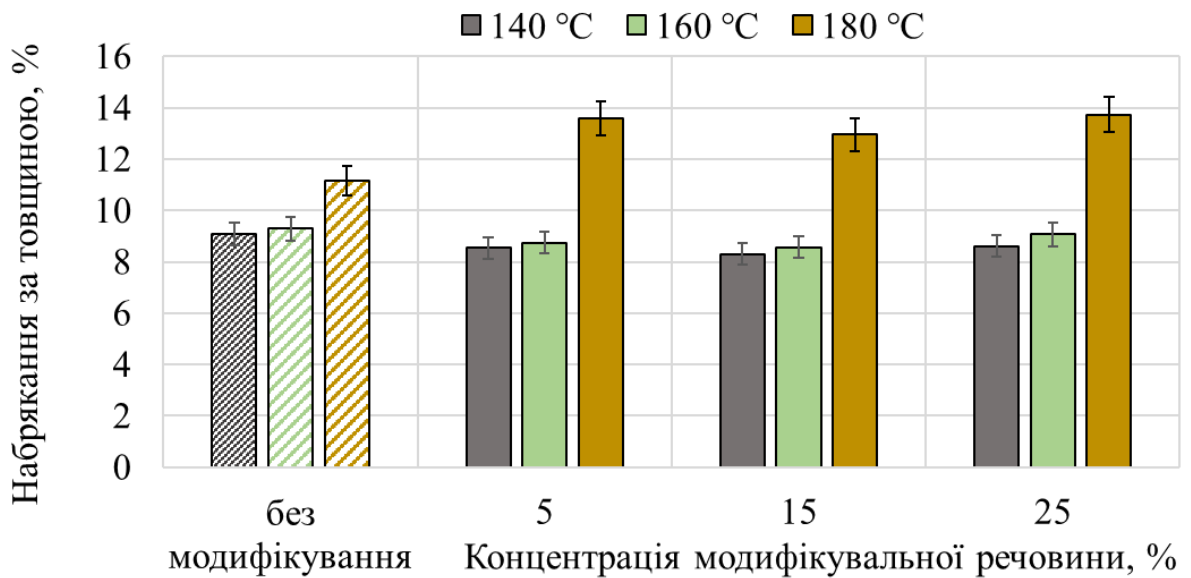


Рис. 3.12 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на набрякання фанери за різних температур пресування

Проте виготовлення фанери за температури 180 °C веде навпаки до збільшення показників набрякання. Ймовірно причиною такої залежності є найнижчі показники щільності фанери, яка тоді поглинає воду більше із зовнішніх сторін, ніж із торців.

3.2. Вплив температури пресування на фізичні властивості фанери

3.2.1. Щільність фанери (EN 323)

За результатами статистичного аналізу побудовано гістограми залежностей показників щільності фанери від температури пресування (рис. 3.13). Як бачимо з рис. 3.13 температура пресування суттєво впливає на щільність фанери. Із збільшенням температури пресування від 140 до 180 °C щільність фанери зменшується, залежно від концентрації модифікувального розчину ЛК: за концентрації 5 % – на 8,83 % (від 704,45 кг/м³ до 641,87 кг/м³); за концентрації 15 % – на 7,03 % (від 720,40 кг/м³ до 669,72 кг/м³); за концентрації 25 % – на 4,81 % (670,84 кг/м³ до 638,55 кг/м³).

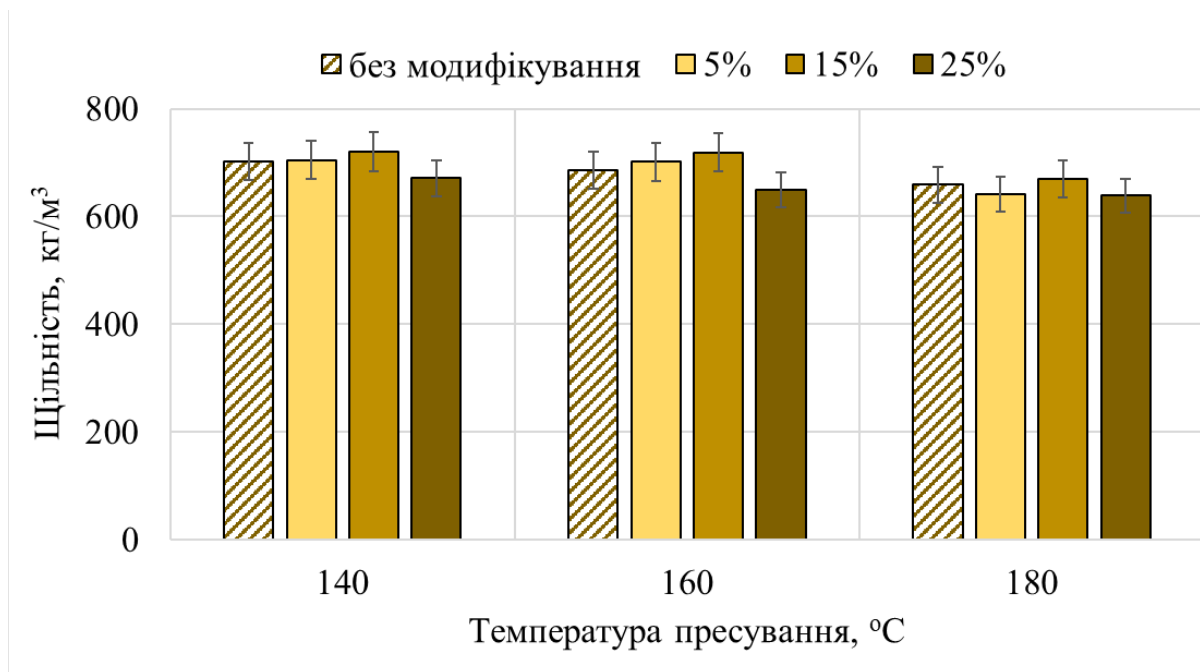


Рис. 3.13 – Вплив температури пресування на щільність фанери

Цю закономірність можна пояснити впливом вологості фанери. Чим більша вологість композиту, тим він пластичніший і, відповідно, більше ущільнюється (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вологість фанери

№з/п	Концентрація розчину, %	Поверхнєве модифікування	Показники вологості, %		
			6,11	5,90	5,71
1	-	ні	6,11	5,90	5,71
2	5	так	5,84	5,74	5,65
3	15	так	5,98	5,80	5,75
4	25	так	5,78	5,67	5,51

Під час виготовлення фанери, склеєної з модифікованого і немодифікованого шпону спостерігається однаковий характер залежності показників щільності від температури пресування.

В загальному концентрація та температура пресування також мають значний вплив на показники щільності фанери. За концентрації модифікувального розчину 5 і 15 % та температури пресування від 140 до 160 °C показники щільності зменшуються не значно – на 0,5 %, а за

концентрації – 25 % – до 3,0 %. Тоді як за температури пресування від 160 до 180 °С і концентрації розчину 5 і 15 % показники щільності зменшуються на 8,5 %, а за концентрації 25 % – на 1,8 %. Така різниця у залежностях є через хімічні реакції, які відбуваються за різної температури та концентрації модифікувального розчину [51].

3.2.2. Водопоглинання фанери після витримки у воді на 24 год (EN 317)

Температура пресування пакетів шпону від 140 до 180 °С також суттєво впливає на водопоглинання фанери (рис. 3.14).

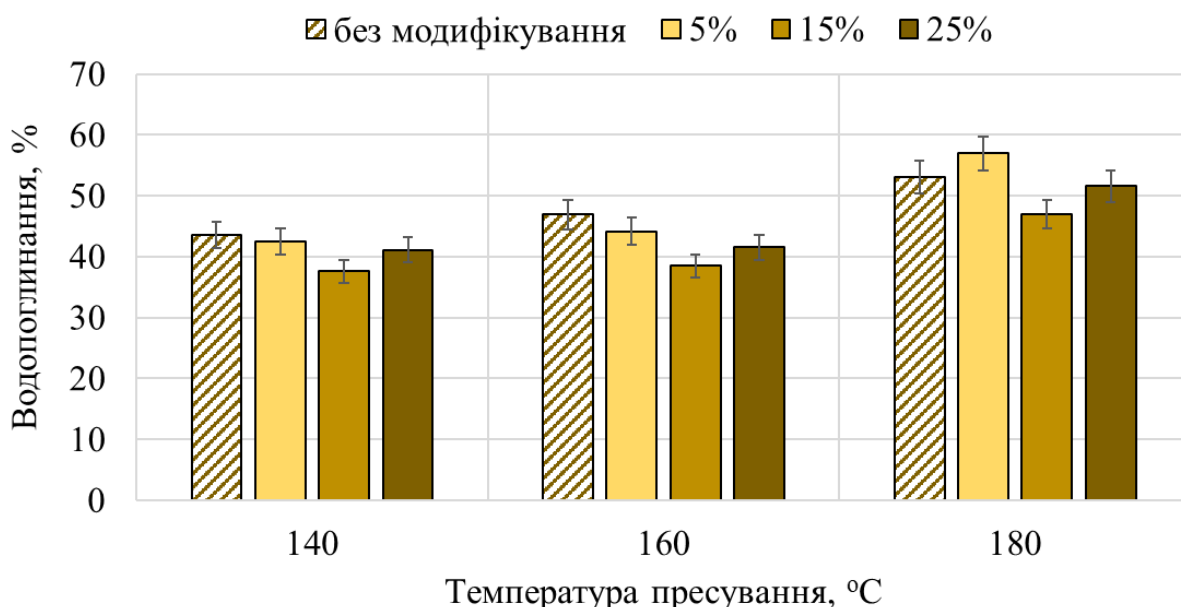


Рис. 3.14 – Вплив температури пресування на водопоглинання фанери

Із збільшенням температури пресування від 140 до 160 °С показники водопоглинання зростають незначно – від 1,0 до 4,0 %, за температури 180 °С – від 22,0 до 29,0 %. Крім того за температури пресування від 140 до 180 °С та концентрації розчину ЛК від 5 до 15 % показники водопоглинання зменшуються, а за концентрації 25 % – збільшуються. Найменші показники водопоглинання спостерігаються для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 15 % за температури

пресування 140 і 160 °С – 37,61 – 38,5 %. За концентрації розчину 25 % погіршуються показники щільності фанери, тому і збільшується водопоглинання фанери. Висока температура пресування – 180 °С теж негативно впливає на водопоглинання, адже за температури 175 °С розпочинається розкладання ЛК до ненасичених кислот з утворенням метилмалеїнового ангідриду та можливість реакції з фенольними гідроксильними групами лігніну. Можна припустити, що час пресування 4,5 хв недостатній для того, щоб відбулася етерифікація [31]. Проте модифікування поверхні шпону розчином ЛК зменшує водопоглинання порівняно із зразками фанери, склеєної з немодифікованого шпону.

3.2.3. Набрякання за товщиною після витримки у воді на 24 год (EN 317)

У випадку з показниками набрякання фанери за товщиною, вплив температури пресування є значним (рис. 3.15).

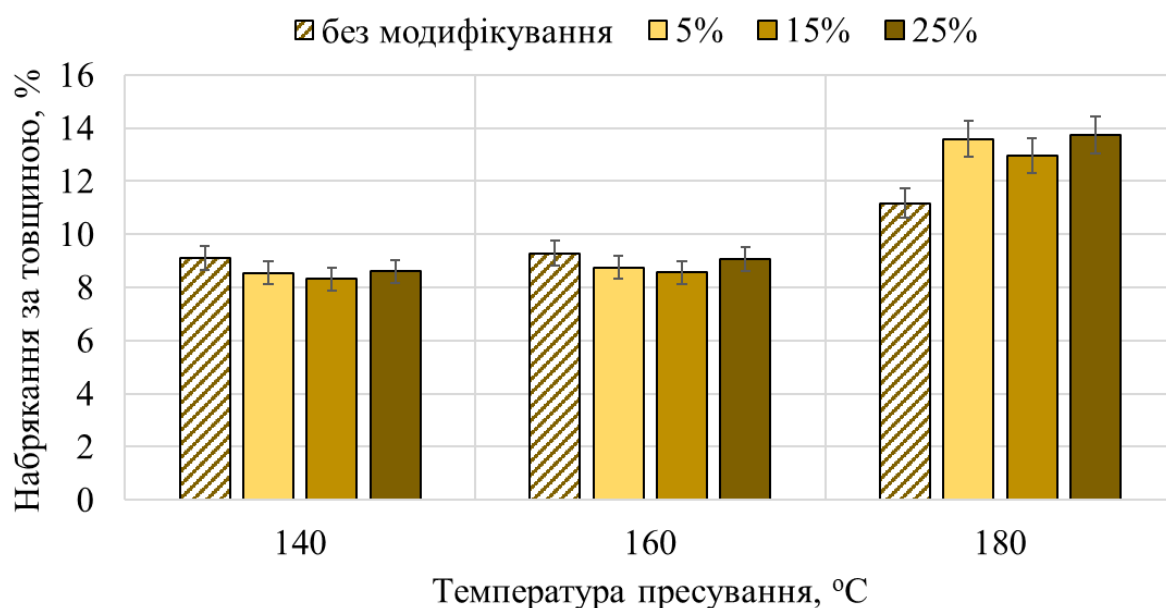


Рис. 3.15 – Вплив температури пресування на набрякання фанери за товщиною

Із збільшенням як концентрації розчину ЛК від 5 до 25 %, так і температури пресування від 140 до 180 °С показники набрякання за

товщиною збільшуються. Найменше набрякання, як і водопоглинання, спостерігається для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 5 і 15 % за температури пресування 140 і 160 °С і становить – 8,31 – 8,57 %. Найбільший показник набрякання за товщиною для зразків фанери, склеєних з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 25 % за температури пресування 180 °С – 13,74 %. Аналогічна тенденція впливу температури пресування на показники набрякання для зразків фанери, склеєних з немодифікованого шпону.

Можна припустити, що за концентрації розчину ЛК від 5 до 15 % збільшується реакційна здатність між деревиною та кислотою, утворюючи складні ефірні зв'язки у клітинах та заповнюючи їх полімером, що блокує потрапляння води у деревину [22, 33]. Тоді як за концентрації 25 % проходить інтенсифікується процес зшивання клітинних стінок деревини, що сповільнює процес затвердіння, і тим самим дозволяє воді легко переміщуватися по структурі деревини. Тим самим висока температура пресування 180 °С ще більше пришвидшує процес зшивання клітинних стінок деревини і не завершення процесу затвердіння.

3.3. ВИСНОВКИ

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що поверхнєве хімічне модифікування шпону розчином лимонної кислоти у виробництві фанери, склеєної первинною плівкою ПЕНГ, є ефективним способом покращення міжфазного з'єднання між термопластичним полімером і деревиною.

Оптимальні температурні режими забезпечують достатню текучість термопластичної плівки, якісне з'єднання шарів шпону та максимальну міцність під час статичного згинання. Надмірно висока температура може призвести до деструкції та зниження міцності деревини, тоді як занизька – до неповного плавлення плівки та слабкої адгезії.

Узагальнення теоретичних і експериментальних даних дозволило сформулювати такі висновки:

1. Проаналізовано вплив концентрації модифікувального розчину та температури пресування на фізичні властивості фанери. Теоретично та експериментально доведено, що фанера зі шпону, хімічно модифікованого розчином лимонної кислоти та склеєна первинною плівкою ПЕНГ, має кращі фізичні показники порівняно з фанерою зі немодифікованого шпону, склеєною аналогічною плівкою.

2. Встановлено, що зі збільшенням температури пресування від 140 до 180 °С щільність фанери зменшується, залежно від концентрації модифікувального розчину ЛК: за концентрації 5 % – на 8,83 % (від 704,45 кг/м³ до 641,87 кг/м³); за концентрації 15 % – на 7,03 % (від 720,40 кг/м³ до 669,72 кг/м³); за концентрації 25 % – на 4,81 % (670,84 кг/м³ до 638,55 кг/м³).

3. З'ясовано, що зі збільшенням температури пресування від 140 до 160 °С показники водопоглинання зростають незначно – від 1,0 до 4,0 %, за температури 180 °С – від 22,0 до 29,0 %. Крім того за температури пресування від 140 до 180 °С та концентрації розчину ЛК від 5 до 15 %

показники водопоглинання зменшуються, а за концентрації 25 % – збільшуються.

4. Із збільшенням як концентрації розчину ЛК від 5 до 25 %, так і температури пресування від 140 до 180 °С показники набрякання за товщиною збільшуються. Найменше набрякання, як і водопоглинання, спостерігається для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 5 і 15 % за температури пресування 140 і 160 °С і становить – 8,31 – 8,57 %. Найбільший показник набрякання за товщиною для зразків фанери, склеєних з модифікованого шпону розчином ЛК концентрацією 25 % за температури пресування 180 °С – 13,74 %.

Підсумовуючи можна сказати, що висока температура пресування (180 °С) негативно впливає на фізичні властивості фанери. Для того, щоб виготовляти фанеру за температури пресування вище 160 °С необхідно більшої тривалості пресування. Щоб процес відповідав промисловій практиці, необхідні додаткові дослідження.

Отже, розвиток виробництва фанери в Україні доцільно спрямовувати на інтеграцію екологічних полімерних технологій, удосконалення методів підготовки поверхонь та оптимізацію режимів пресування. Це дозволить отримати конкурентоспроможні матеріали з покращеними експлуатаційними властивостями та зменшеним впливом на довкілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сагаль С. (2014). Аналіз потенціалу лісового сектору України та виявлення факторів, що гальмують його інноваційний розвиток. ENPI EAST FLEG II. URL: <http://www.fleg.org.ua/docs/213>. (дата звернення 12.10.2025).
2. Виробництво окремих видів промислової продукції (2011–2020 рр.). Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 12.10.2025).
3. Виробництво окремих видів промислової продукції (2021 р.). Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 12.10.2025).
4. Lisderevmash. Україна збільшила експорт фанери за 7 місяців 2024 року. URL: <https://lisderevmash.ua/ukraina-zbilshila-eksport-faneri-za-7-m/>.
5. Bekhta P., Sedliačik J. Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers (Basel)*, 2019, Vol. 11, №7:1166. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11071166>.
6. Goto, T., Saiki, H., Onishi, H. Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding. *Wood Sci. Technol*, 1982, 16, 293–303. <https://doi.org/10.1007/BF00353157>. (in English).
7. Fang, L., Chang, L., Guo, W., Chen, Y., Wang, Z. Manufacture of environmentally friendly plywood bonded with plastic film. *Forest Products Journal*, 2012, 63 (7/8), 283–288. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00062>. (in English).
8. Han, K-S., & Lee, H-H. Adhesion characteristics and anatomic scanning of plywood bonded by high density polyethylene. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 1997, 25 (3), 16–23. (in Korea).
9. Chang, L., Guo, W., Tang, Q. Assessing the tensile shear strength and interfacial bonding mechanism of poplar plywood with high-density polyethylene films as adhesive. *BioResourees*, 2017, 12 (1), 571–585. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.571-585>. (in English).

10. Bekhta, P.; Pizzi, A.; Kusniak, I.; Bekhta, N.; Chernetskyi, O.; Nuryawan, A. A Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. *Materials*, 2022, 15, 4942. <https://doi.org/10.3390/ma15144942>.
11. Fang L., Chang L., Guo W., Ren Y., Wang Z. Preparation and characterization of wood-plastic plywood bonded with high density polyethylene film. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, Vol. 71. P. 739–746. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0733-0>.
12. Song W., Wenbang W., Congrong R., Shuangbao Z. Developing and evaluating composites based on plantation eucalyptus rotary-cut veneer and high-density polyethylene film as novel building materials. *BioResources*, 2016, Vol. 11, №2. P. 3318–3331.
13. Lustosa ECB, Del Menezzi CHS, de Melo R.R. Production and properties of a new wood laminated veneer/high-density polyethylene composite board. *Materials Research*, 2015, Vol. 18, №5. P. 994–999. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.010615>.
14. Бехта П.А., Кусняк І.І. Властивості фанери з використанням як клею термопластичної плівки. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів, 2019, Вип. 19. С. 209–222. DOI: <https://doi.org/10.15421/411943>.
15. Bekhta P., Müller M., Hunko I. Properties of Thermoplastic-Bonded Plywood: Effects of the Wood Species and Types of the Thermoplastic Films. *Polymers*, 2020, 12(11), 2582. <https://doi.org/10.3390/polym12112582>.
16. Fang, L., Chang, L., Guo, W., Chen, Y., Wang, Z. Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood. *Applied Surface Science*, 2014, 288, 682–689. (in English).
17. Matuana, L.M., Balatinecz, J.J., Park, C.B. Effect of surface properties on the adhesion between PVC and wood veneer laminates. *Polymer Engineering and Science*, 1998, 38 (5), 765–773. <https://doi.org/10.1002/pen.10242>. (in English).

18. Segerholm, B.K., Walinder, M.P., Holmberg, D. Adhesion studies of Scots pine-polypropylene bond using ABES. *Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE)*. Tallinn, Estonia, 2010, 142–146. (in English).

19. Song, W., Wenbang, W., Xuefei, L., Shuangbao, Z. Utilization of polypropylene film as an adhesive to prepare formaldehyde-free, weather-resistant plywood-like composites: Process optimization, performance evaluation, and interface modification. *BioResources*, 2017, 12 (1), 228–254. (in English).

20. Tang, L., Zhao-gang, Z., Jiao, Q., Ji-ruo, Z., Ying, F. The preparation and application of a new formaldehyde-free adhesive for plywood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011, 31(6), 507–512. (in English).

21. Bekhta, P., Chernetskyi, O., Kusniak, I., Bekhta, N., Bryn, O. Selected Properties of Plywood Bonded with Low-Density Polyethylene Film from Different Wood Species. *Polymers*, 2022, 14, 51, 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym14010051>.

22. Bekhta P., Sedliačik J., Kusniak I., Gryc V., Pipíška T., Ráhel' J., Lepcio P., Pavliňák D., Tymyk D., Chernetskyi O. Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, 134, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103781>.

23. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С. Вплив породи деревини і товщини термопластичної плівки первинного поліетилену низької густини на фізичні властивості фанери. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2022, 32, 1, 73–78. <https://doi.org/10.36930/40320111>.

24. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С., Копанський М.М. Вплив породи деревини і товщини термопластичної плівки вторинного поліетилену низької густини на фізичні властивості фанери. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2022, 32, 3, 73–78. <https://doi.org/10.36930/40320312>.

25. Бехта П.А., Кусняк І.І., Чернецький О.М., Бехта Н.С. Механічні властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою первинного

поліетилену низької густини. Наукові праці Лісівничої академії наук України, 2022, 24, 176–184. <https://doi.org/10.15421/412216>.

26. Бехта П.А., Кусняк І.І., Чернецький О.М., Бехта Н.С., Козак Р.О., Бринь О.І., Копанський М.М. Вплив модифікування шпону на властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ. Наукові праці Лісівничої академії наук України, 2023, 25, 167-177. <https://doi.org/10.15421/412314>.

27. Фабуляк Ф.Г., Іванов С.В., Масленнікова Л.Д. Хімія і технологія олігомерів: підручник. Київ: Книжкове вид-во Нац. авіац.ун-ту "НАУ-друк", 2010. 400 с.

28. Smith, M.J., Dai, H., Ramani, K. Wood–thermoplastic adhesive interface–method of characterization and results. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002, 22(3), 197–204. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00055-0). (in English).

29. Umemura, K., Takahashi, A., Kawal S. Durability of isocyanate resin adhesives for wood. II. Effect of the addition of several polyols on the thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 74, 7–14. (in English).

30. Lee, S. H.; Md Tahir, P.; Lum, W. C.; Tan, L. P.; Bawon, P.; Park, B.-D.; Osman Al Edrus, S. S.; Abdullah, U. H. A Review on Citric Acid as Green Modifying Agent and Binder for Wood. *Polymers*, 2020, 12 (8), 1692. <https://doi.org/10.3390/polym12081692>.

31. Del Menezzi, C.; Amirou, S.; Pizzi, A.; Xi, X.; Delmotte, L. Reactions with wood carbohydrates and lignin of citric acid as a bond promoter of wood veneer panels. *Polymers*, 2018, 10, 833. <https://doi.org/10.3390/polym10080833>.

32. Zhao, Z.; Sakai, S.; Wu, D.; Chen, Z.; Zhu, N.; Huang, C.; Sun, S.; Zhang, M.; Umemura, K.; Yong, Q. Further exploration of sucrose – Citric acid adhesive: Investigation of optimal hot-pressing conditions for plywood and curing behavior. *Polymers*, 2019, 11, 1996. <https://doi.org/10.3390/polym11121996>.

33. Sun, S.; Zhao, Z.; Umemura, K. Further exploration of sucrose-citric acid adhesive: Synthesis and application on plywood. *Polymers*, 2019, 11, 1875. <https://doi.org/10.3390/polym11111875>.

34. Umemura, K.; Ueda, T.; Munawar, S.S.; Kawai, S. Application of citric acid as natural adhesive for wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 2012, *123*, 1991–1996. <https://doi.org/10.1002/app.34708>.

35. Бехта П.А. Технологія деревинних композиційних матеріалів: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1997. 236 с.

36. Бехта П.А., Салабай Р.Г. Класифікація деревинних композиційних матеріалів. Науковий збірник Лісівничої академії наук України "Наукові праці". 2002. Вип. 1. С. 114–117.

37. Dunky M. Adhesives in the Wood Industry. In: Handbook of Adhesive Technology: 2nd edition, revised and expanded / edited by A.Pizzi & K.L.Mittal. Marcel Dekker, Inc. New York – Basel. 2003.

38. Pizzi A., Mittal K. L. Handbook of adhesive technology: 2 edition, revised and expanded. New York: U.S.A., 2003. 999 p.

39. Патент на корисну модель № 141281, Україна, МПК В27N 3/00. Спосіб виготовлення екологічно чистих деревинних композитних матеріалів на основі шпону / Бехта П. А., Кусняк І. І.; власники Бехта П. А., Кусняк І. І. – Номер заявки u 201910697; заявл. 29.10.19; опубл. 25.03.20. Бюл. № 6.

40. Бехта П. А., Кусняк І. І. Термопластичні полімери у виробництві фанерної продукції: переваги, можливості та перспективи застосування. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів, 2018. Вип. 16. С. 131–140. <https://doi.org/10.15421/411815>

41. Бехта П. А., Козак Р. О., Кусняк І. І. Математичне моделювання процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2020. Т. 30. Вип. 3. С. 93–98. <https://doi.org/10.36930/40300316>

42. Кусняк І. І. Прогрівання пакета шпону у виробництві фанери склеєної термопластичною плівкою. *Прикладні науково-технічні дослідження: IV міжнар. наук.-практ. конф., 1 – 3 квітня 2020 р.* Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2020. Т1. С. 140–142.

43. Кусняк І. І., Копанський М. М. Вплив використання як клею термопластичної плівки на процес прогрівання пакета шпону у виробництві фанери. *Сучасний рух науки: тези доп. ІХ міжнар. наук.-практ. інтер.-конф.*, 2–3 грудня 2019 р. Дніпро: Міжнародний електронний науково-практичний журнал "WayScience", 2019. Т2. С. 232–235.

44. Кусняк І.І. Розроблення режимів склеювання шпону з використанням термопластичних полімерів: Дис...канд. техн. наук: 05.23.06. Л., 2020. - 172 с.

45. Патент України на корисну модель №156471 Україна, МПК В27D 1/00, В27D 1/04, В27N 3/00. Спосіб виготовлення екологічно чистих деревинно-пластикових композитних матеріалів на основі шпону / Бехта П.А., Кусняк І.І., Чернецький О.М., Ян Седлячік, Владімір Гриць, Томаш Піпіска, Йозеф Рахель; власник Бехта П.А. – Номер заявки u 2024 00480; заявл. 29.01.24; опубл. 27.06.24. Бюл. №26.

46. Чернецький О.М., Кусняк І.І. Вплив породи деревини на фізичні властивості фанери склеєної термопластичною плівкою. *Scientific practice: modern and classical research methods: Collection of scientific papers “ΛΟΓΟΣ” with Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Boston, October 15, 2021. Boston-Vinnytsia: Primedia eLaunch & European ScientificPlatform. 2021. С. 67-69. <https://doi.org/10.36074/logos-15.10.2021.18>.*

47. Чернецький О.М., Кусняк І.І. Вплив витрати термопластичної плівки на фізичні властивості букової фанери. *Sectoral research XXI: characteristics and features: collection of scientific papers “SCIENTIA” with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 1), October 15, 2021. Chicago, USA: European Scientific Platform. С. 57-60.*

48. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С. Вплив товщини вторинної поліетиленової плівки на фізичні властивості букової фанери. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф., 26 – 27 травня 2022 р. Чернігів: Національний університет “Чернігівська політехніка”. 2022. Т1. С. 173-175.*

49. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С. Вплив модифікування шпону на водостійкість фанери. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: *Матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2023 р.* Чернігів: Національний університет “Чернігівська політехніка”. 2023. Т1. С. 254-255.

50. Teixeira D., Pereira D., Nakamura A., Brum S. Adhesivity of bio-based anhydrous citric acid, tannin-citric acid and ricinoleic acid in the properties of formaldehyde-free medium density particleboard (MDP). *Drvna industrija*. 2020. Vol. 71, No 3. P. 235-242. DOI: <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1917>.

51. Cahyono T., Syahidah. Citric acid, an environmentally friendly adhesive and wood impregnation material-review of research. *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 593, No 012009. DOI: <https://doi: 10.1088/1757-899X/593/1/012009>.

52. Widyorini R., Dewi G.K., Nugroho W.D., Prayitno T.A., Jati A.S., Tejolaksono M.N. Properties of citric acid-bonded composite board from elephant dung fibers. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 2018. Vol. 46. P. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.2.132>.

53. Indrayani Y., Setyawati D., Munawar S.S., Umemura K., Yoshimura T. Evaluation of termite resistance of medium density fiberboard (MDF) manufacture from agricultural fiber bonded with citric acid. *Procedia Environ. Sci.* 2015. Vol. 28. P. 778–782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.091>.

54. Tjeerdsma B., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. Characterisation of Thermally Modified Wood: Molecular Reasons for Wood Performamnce Improvement. *Holz Roh Werkst.* 1998. Vol. 56, No 3. P. 149 – 153.

55. Yang H.S., Wolcott M.P., Kim H.S., Kim S., Kim H.J. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites. *Composite Structures*. 2007. Vol. 79, No 3. P. 369 – 375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.02.016>.

56. Borovanska I., Dobрева T., Benavente R., Djoumalisky S., Kotzev G. Quality assessment of recycled and modified LDPE/PP blends, *J. Elastom. Plast.*

2012. Vol. 44, No 6. P. 479–497. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244312441731>.

57. Rosa SM, Rehman N, de Miranda MIG, Nachtigall SM, Bica CI. Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. *Carbohydr Polym.* 2012. Vol. 87, No 2. P. 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.084>.

58. de Cuadro P, Belt T, Kontturi KS, Reza M, Kontturi E, Vuorinen T, Hughes M. Cross-linking of cellulose and poly (ethylene glycol) with citric acid. *React Funct Polym.* 2015. Vol. 90. P. 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.03.007>.

59. Bernard FL, Rodrigues D, Polesso BB, Chaban VV, Serefin M, Dalla Vecchia F, Einloft S. Development of inexpensive cellulose-based sorbents for carbon dioxide. *Braz J Chem Eng.* 2019. Vol. 36. P. 511–521. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170182>.

60. Mubarok M., Militz H., Dumarçay S., Gérardin P. Beech wood modification based on in situ esterification with sorbitol and citric acid. *Wood Sci. Technol.* 2020. Vol. 54. P. 479-502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01172-7>.

61. Jarvela P., Jarvela P., Tervala O. Thermoplastic coating for plywood, modification and properties of thermoplastics. VTT Press Releases - State Technical Research Center. 1996. Vol. 1803. P. X–32.

62. Jarvela P.K., Tervala O., Jarvela P.A. Coating plywood with a thermoplastic. *International Journal of Adhesion & Adhesives.* 1999. Vol. 19. P. 295–301.

63. Tervala O., & Jarvela P. Thermoplastic coating processes for plywood. *Polymer-Plastics Technology and Engineering.* 1999. Vol. 38, №4. P. 831–848.

64. Пат. 92185, МКИ В 27 D 1/04, В 27 D 5/00 CPP. Intreprinderea de Prelucrare a Lemnului, Constanta. Procedeu pentru realizarea furnirului plastificat / Bulzan Titus, Ghitescu Vasile. № 118088; заявл. 22.03.85; опубл. 15.05.87.

65. Matsi M., Rohumaa A., Piirlaid M., Hughes M., Meier P. Assessing the potential of furan polymer-based resin development in bonded veneer processing factors on adhesive bond strength. Proceedings of the 6th meeting of the Nordic Baltic Network In Wood Material Science And Engineering (WSE). Tallinn, Estonia, 2010. 193 p.

66. Пилипчук М.І., Григор'єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень: підручник. Київ: Знання. 2007. 270 с.

67. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.

68. EN 315: 2000. Plywood. Tolerances for Dimensions. [Published 2000-15-09]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 2000. 8 p.

69. EN 323:1993. Wood-Based Panels–Determination of Density. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.

70. EN 317: 1993. Particleboards and Fibreboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.