

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 676.275

Пояснювальна записка

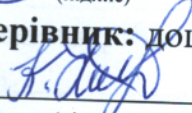
до дипломної роботи магістра на тему:

“ Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні показники якості картону-лайнера ”

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


Сергій КРЯЖОК
(підпис)

Керівник: доц. каф. ТДКМ, к.т.н.


Ірина КУСНЯК
(підпис)

Рецензент: доц., к.т.н.
(посада, вчене звання, науковий ступінь)


(підпис)

Ю.М.Тудер
(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

Кряжку Сергію Анатолійовичу

1. Тема роботи Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні показники якості картону-лайнера.
керівник роботи доц. кафедри ТДКМ Кусняк Ірина Іванівна, к.т.н.,
затверджені наказом університету від "28" жовтня 2024 року № С-847
2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати сучасний стан виробництва картону-лайнера в Україні та світі, дослідити основні види сировини, що використовуються у виробництві картону та можливості їх комбінування, розробити експериментальну методику оцінювання впливу модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні властивості картону, здійснити експериментальні дослідження та встановити залежність міцнісних показників від концентрації крохмального розчину.
4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
 1. Стан питання та завдання дослідження.
 2. Методика експериментальних досліджень.
 3. Результати досліджень.
 4. Висновки
5. Дата видачі завдання 25.07.2025 р.

Студент 

(підпис)

Сергій КРЯЖОК

Керівник роботи 

(підпис)

Ірина КУСНЯК

Анотація

У дипломній роботі досліджено вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на формування основних фізико-механічних показників якості картону-лайнера, який застосовується в структурі гофрованого картону для пакування. Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до міцності, стабільності параметрів та ресурсощадності картонно-паперової продукції в умовах інтенсивного розвитку логістики та електронної комерції.

Метою дослідження є визначення впливу різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю – нативного, катіонного, окисненого та ацетильованого – на показники маси, абсолютного опору продавлюванню та руйнівного зусилля стискання кільця у поперечному напрямку.

В першому розділі проаналізовані сучасний стан виробництва картону-лайнера в Україні та світі, основні види сировини, що використовуються у виробництві картону, а також види модифікувальних добавок та їх вплив на фізико-механічні властивості картону.

В другому розділі описані методики приготування зразків картону-лайнера та визначення фізико-механічних показників якості картону-лайнера: маси, абсолютного опору продавлювання, руйнівного зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку.

В третьому розділі наводяться результати випробувань, де проаналізовано вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на показники якості картону-лайнера. Встановлено, що оптимальна концентрація модифікованого кукурудзяного крохмалю у поверхневому клеї становить 2 %, оскільки подальше збільшення концентрації не призводить до еквівалентного зростання міцнісних показників, а також може спричинити підвищення нерівномірності нанесення покриття та збільшення витрати енергії на сушіння.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дипломної роботи складає 61 сторінки, з них 45 сторінок основного тексту, список літератури із 42 назв.

Ключові слова: картон-лайнер, модифікований крохмаль, поверхнєве проклеювання, міцність, опір продавлювання, руйнівне зусилля під час стискання кільця.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Виробництво картону-лайнера в Україні та світі.....	7
1.2. Сировина для виробництва картону-лайнера.....	11
1.3. Аналіз використання модифікувальних добавок у виробництві картону-лайнера.....	18
1.4. Висновки.....	23
Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	25
2.1. Матеріали та обладнання.....	25
2.2. Методика виготовлення зразків картону-лайнера.....	26
2.3. Визначення показників якості картону-лайнера.....	27
2.3.1. Визначення маси картону-лайнера за площиною.....	27
2.3.2. Визначення абсолютного опору продавлювання.....	30
2.3.3. Визначення руйнівного зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку.....	34
2.4. Статистична обробка результатів досліджень.....	38
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на масу картону.....	39
3.2. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на абсолютний опір продавлювання картону-лайнера.....	41
3.3. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку.....	45
3.4. Висновки.....	49
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	51
ДОДАТКИ	55

ВСТУП

Сучасний розвиток паперово-картонної промисловості вимагає постійного вдосконалення технологічних процесів і підвищення якості готової продукції при одночасному зниженні собівартості та зменшенні негативного впливу на довкілля. Одним із найбільш динамічно зростаючих напрямів у цьому контексті є виробництво пакувальних матеріалів на основі вторинної сировини, зокрема картону-лайнера. Зростання попиту на тару з гофрованого картону, яка є екологічно безпечною і придатною для повторної переробки матеріалом, посилює пошук нових технологічних рішень щодо підвищення міцності, вологостійкості та стабільності показників якості картону-лайнера.

Одним із ефективних способів удосконалення властивостей картону-лайнера є використання модифікованих крохмалів у процесі проклеювання та зміцнення структури волокнистої маси. Крохмаль, як природний полімер, широко застосовується у виробництві паперу та картону завдяки своїй доступності, біорозкладності та можливості хімічного модифікування [9, 11, 12, 26]. Особливо перспективним є використання кукурудзяного крохмалю, який має стабільну якість, значний вихід амілози й амілопектину, а також добре піддається модифікуванню. Завдяки зміні його молекулярної структури можна коригувати в'язкість розчину, температуру клейстеризації, адгезійні властивості та взаємодію з волокнистою основою.

Застосування модифікованого кукурудзяного крохмалю у виробництві картону-лайнера дозволяє не лише покращити механічні показники, зокрема міцність під час стискання та опір продавлюванню, а й оптимізувати витрати енергії та хімічних реагентів. Крім того, це сприяє зменшенню використання синтетичних полімерів і підвищує екологічну безпечність готової продукції. Незважаючи на значну кількість досліджень, питання вибору оптимальної концентрації та виду модифікованого крохмалю залишається актуальним для різних сортів целюлозно-паперової сировини та умов виробництва [11, 12, 24, 25].

У більшості випадків виробники використовують стандартні крохмальні композиції без врахування особливостей сировини та технологічних параметрів виробництва. Це призводить до нестабільності показників якості картону, перевитрат клею або недостатньої міцності виробу. Тому актуальним є дослідження впливу модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні властивості картону-лайнера, що дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо його застосування в промислових умовах.

Метою дипломної роботи є з'ясувати фізико-механічні показники якості картону-лайнера, виготовленого з модифікованого кукурудзяного крохмалю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на масу картону-лайнера.

2. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на абсолютний опір продавлювання картону-лайнера.

3. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку.

Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Виробництво картону-лайнера в Україні та світі

Картон-лайнер є одним з основних складових тришарового гофрованого картону. Він широко використовується для виготовлення транспортної, споживчої та спеціальної тари. Його основна функція полягає у забезпеченні жорсткості, міцності й стабільності гофрованої структури, що визначає експлуатаційні властивості пакувальної продукції. Споживання картону-лайнера у світі демонструє стабільну тенденцію до зростання, що зумовлено глобальним розширенням електронної комерції, підвищенням вимог до екологічних пакувальних матеріалів та переходом низки галузей на поновлювані ресурси [1].

За даними міжнародних аналітичних агентств, у 2024 році світове виробництво картону-лайнера перевищило 190 млн тон (рис. 1.1), що становить близько 40 % загального обсягу виробництва паперово-картонних матеріалів [2].

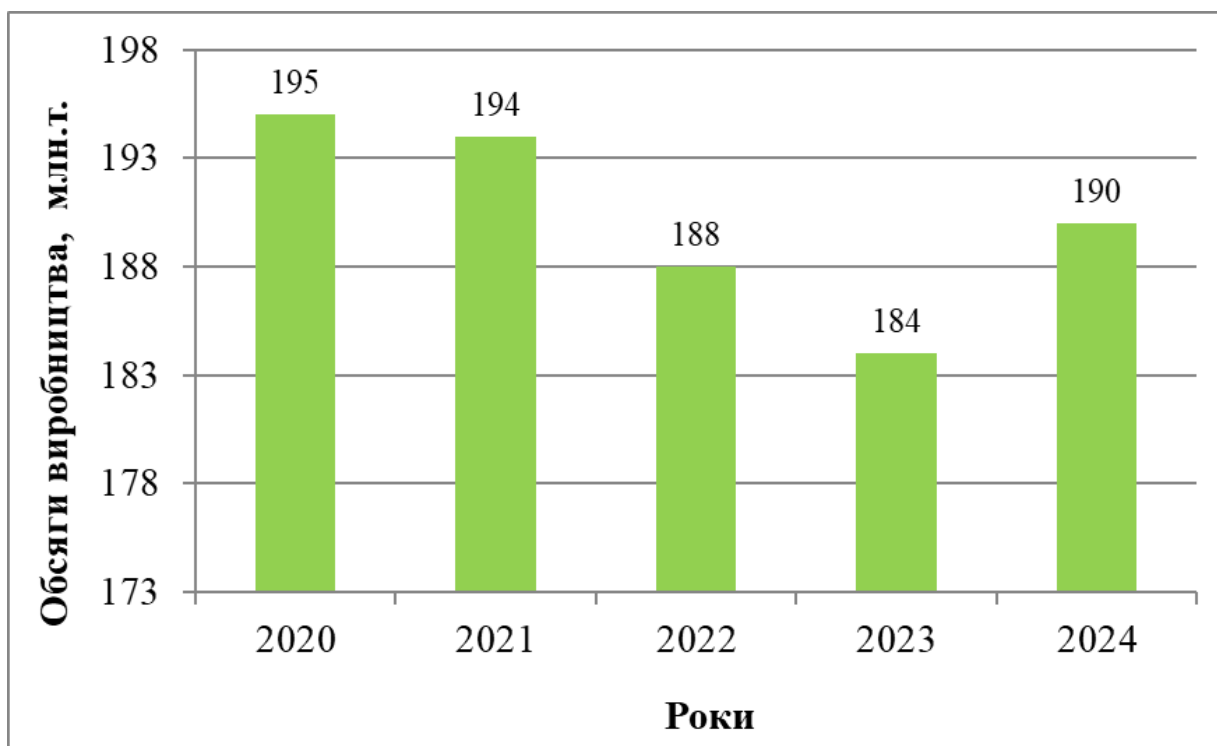


Рис. 1.1 – Світовий ринок виробництва картону

Найбільшими виробниками картону у світі є Китай, США, Німеччина, Японія та Індія. Китай забезпечує понад 35 % глобального ринку лайнера, що обумовлено потужною внутрішньою логістичною та експортною інфраструктурою [3]. США – лідер у сегменті виробництва картону-лайнера з макулатурної сировини, що пов'язано із запровадженням жорстких екологічних стандартів. Європейський Союз демонструє стабільне зростання в межах 2–3 % на рік завдяки модернізації виробництв і впровадженню технологій енергоефективності.

У світовій практиці переважає виробництво тест-лайнера (testliner) – багатошарового картону на основі макулатури, який замінює традиційний крафт-лайнер (kraftliner), виготовлений з первинної целюлози. Така заміна дозволяє суттєво знизити собівартість та екологічне навантаження на довкілля. У технологічному аспекті світові виробники активно впроваджують системи енергоефективного сушіння, багатоступеневі методи утилізації волокон, автоматизоване управління якістю (QCS) та застосування модифікованих крохмалів для підвищення показників міцності картону [4].

Сучасні технології виробництва картону-лайнера спрямовані на підвищення міцності під час стискання (CCT, RCT), опору продавлюванню (Burst strength), жорсткості під час згинання та вологоміцності. Для цього використовуються поверхневі проклеювальні композиції на основі крохмалю, полівінілового спирту або термопластичних дисперсій, а також внутрішні модифікувальні речовини волокнистої маси. Особлива увага приділяється енергоощадним режимам сушіння та зниженню питомої витрати пари, що зумовлено зростанням вартості енергоносіїв у світі.

У світовій практиці спостерігається перехід від традиційного хімічного відбілювання до використання безхлорних технологій (ECF, TCF), що дає змогу покращити екологічну безпеку виробництва та зменшити кількість шкідливих відходів. Компанії, що впроваджують принципи “зеленої економіки”, активно сертифікують свою продукцію за стандартами FSC і PEFC, що забезпечує простежуваність походження деревинної сировини.

В Україні виробництво картону-лайнера є одним із стратегічно важливих напрямів целюлозно-паперової галузі. За інформацією асоціації “УкрПапір”, обсяги виробництва тарного картону (включно з лайнером і флотаційними марками) перевищували 800–900 тис. тон на рік до 2022 року (рис. 1.2), після чого спостерігались коливання, пов’язані з логістичними і ресурсними обмеженнями [5]. Незважаючи на складну економічну ситуацію та військові виклики, целюлозно-паперова галузь зберігає тенденцію до відновлення. У 2023–2024 роках загальний обсяг виробництва тарного картону становив приблизно 350–400 тис. тонн, з яких до 60 % припадало на картон-лайнер різних марок. Основними центрами виробництва є підприємства у Київській, Львівській, Хмельницькій, Черкаській та Сумській областях.

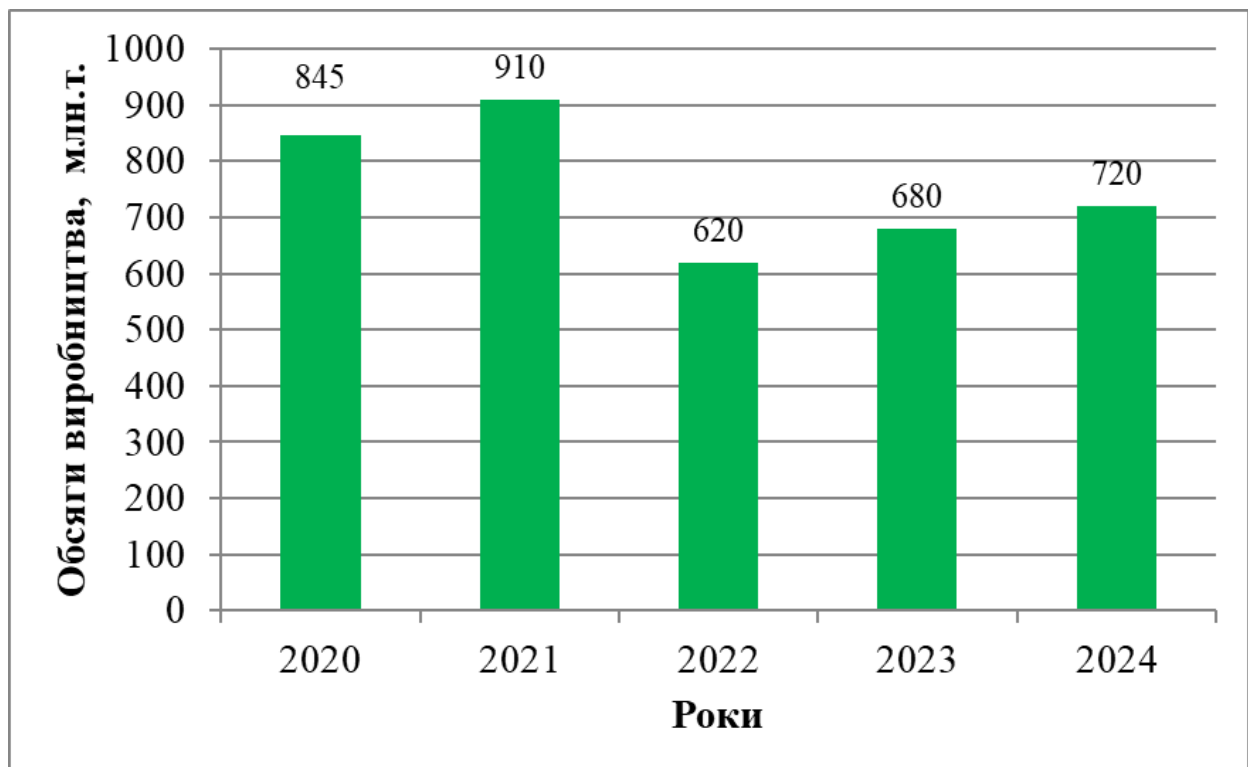


Рис. 1.2 – Виробництво картону в Україні

До провідних українських підприємств з виробництва картону належать (рис. 1.3):

- ПрАТ “Київський КПК”
- ПАТ “Жидачівський ЦПК”
- ПАТ “Ізмаїльський ЦКК”

- ТОВ “Понінківська КПФ-Україна”
- ТОВ “Луцька КПФ- Україна”
- ТОВ ВО “Папір- Мал”
- ПАТ “Роганська КФ”

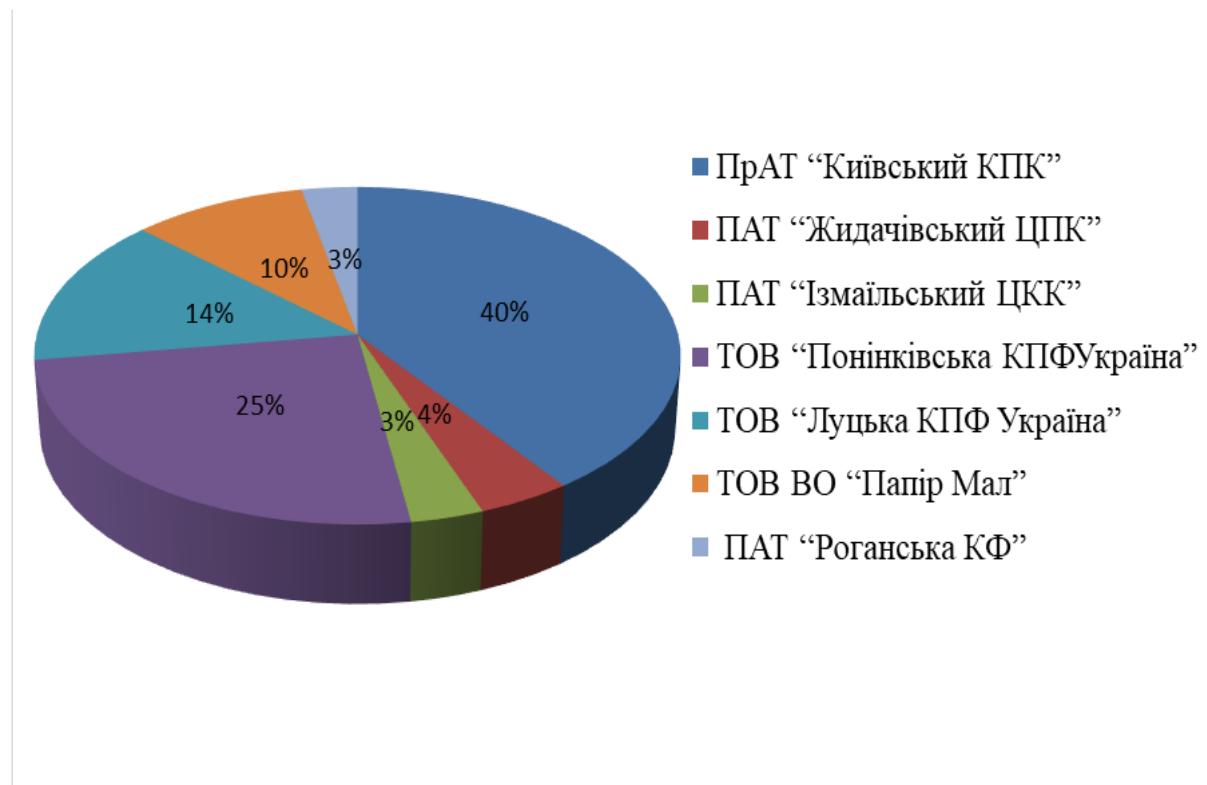


Рис. 1.3 – Графічне порівняння частки кожного українського підприємства у загальному обсязі виробництва картону в 2022 році [6]

Ці підприємства працюють переважно на основі макулатурної сировини, що відповідає світовим тенденціям переходу до замкнених циклів виробництва. Більшість з них модернізували свої технологічні лінії, впровадивши сучасні папероробні машини європейського виробництва (Voith, Metso, Andritz) з автоматизованими системами керування.

Основною проблемою українського виробництва є нестача якісної вторинної сировини та висока енергомісткість процесу. Частина макулатури експортується, а імпортована має високу ціну через логістичні витрати. Тому значна увага приділяється підвищенню ефективності використання наявної сировини та оптимізації рецептур волокнистих мас. У цьому контексті

перспективним напрямом є використання модифікованих природних полімерів, зокрема кукурудзяного крохмалю, для підвищення міцності картону без суттєвого збільшення витрат волокон.

Згідно з прогнозами експертів, попит на картон-лайнер в Україні до 2030 року зросте щонайменше на 25–30 %, що пов'язано з розвитком логістики, торгівлі, експорту агропродукції та електронної комерції. Відповідно, зростатиме потреба у вдосконаленні технологій проклеювання, поверхневої обробки та зміцнення волокон. У світі активно впроваджуються біотехнологічні методи модифікування крохмалю – ферментативна обробка, оксиетилування, карбоксиметилування – які дозволяють покращити адгезію до волокна та зменшити в'язкість клеїв. Такі рішення дозволяють не лише зменшити споживання синтетичних добавок, а й отримати продукцію, що відповідає вимогам циркулярної економіки.

Поряд із цим розвивається виробництво високоміцних багатошарових лайнерів, де кожен шар виконує певну функцію: зовнішній – забезпечує гладкість і можливість друку, середній – жорсткість, а внутрішній – адгезію до гофрованого шару. Для підвищення ефективності використовують композитні речовини з поєднанням модифікованого крохмалю, дисперсійного латексу та нанодобавок (наприклад, діоксиду титану чи нанокремнезему).

1.2. Сировина для виробництва картону-лайнера

Виробництво картону-лайнера – одного з основних компонентів тришарових гофрованих матеріалів – ґрунтується на використанні волокнистої сировини рослинного походження, переважно целюлозних напівфабрикатів, вторинної макулатури, а також допоміжних хімічних добавок. Вибір виду сировини визначає основні фізико-механічні властивості готового матеріалу: міцність на розривання, під час стискання, жорсткість, водостійкість тощо.

У сучасному виробництві картону-лайнера застосовують три головні групи волоконних напівфабрикатів:

1. Первинна деревинна целюлоза, отримана сульфатним або сульфітним способом із хвойних і листяних порід деревини (рис. 1.4).



Рис. 1.4 – Первинна деревинна целюлоза

2. Хвойна целюлоза (ялина, сосна, модрина) характеризується довгими волокнами (2,5–4,0 мм), що забезпечує високу розривну міцність і жорсткість картону.

3. Листяна целюлоза (береза, бук, тополя) має коротші волокна (0,8–1,5 мм), що сприяє підвищенню гладкості поверхні та зменшенню пористості. Для верхнього шару (лайнера) зазвичай використовують відбілену або напіввідбілену хвойну целюлозу.

Вміст органічних сполук в різних породах деревини є різноманітний, навіть в межах однієї породи деревини. Їх хімічний склад буде змінюватись, залежно від природних умов росту дерева (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Характеристика хімічного складу деревини залежно від різних видів порід [7]

Порода	Хімічний склад деревини, %				
	<i>целюлоза</i>	<i>лігнін</i>	<i>гексозани</i>	<i>пентозани</i>	<i>смоли та жири</i>
<i>Ялина</i>	45,2	28,1	12,3	10,3	1,9
<i>Сосна</i>	50,6	27,5	11,8	10,4	5,4
<i>Модрина</i>	36,2	28,6	13,5	11,6	2,4
<i>Береза</i>	41,0	21,0	3,0	28,0	1,2
<i>Вільха</i>	44,5	28,0	3,65	22,9	1,8
<i>Осика</i>	43,6	20,1	2,0	26,0	1,5
<i>Клен</i>	48,0	23,1	2,3	26,0	1,6
<i>Бук</i>	49,6	21,8	4,37	25,6	0,9
<i>Дуб</i>	37,1	22,0	2,7	22,6	1,6
<i>Липа</i>	41,1	20,2	2,2	20,5	1,1
<i>Ясен</i>	40,6	21,3	3,47	23,2	1,2
<i>Верба</i>	38,8	20,5	2,6	21,1	0,8
<i>Тополя</i>	42,1	20,8	2,1	20,1	1,3
<i>Граб</i>	41,3	21,0	2,87	20,8	1,0

4. Макулатурна сировина – вторинні волокна, що утворюються внаслідок перероблення відходів паперу й картону (рис. 1.5).



Рис. 1.5 – Макулатурна сировина

Використання вторинних волокон дозволяє суттєво знизити собівартість

продукції, енергоспоживання та екологічне навантаження на довкілля.

Згідно ДСТУ 3500:2009 [38, 39], залежно від складу макулатуру поділяють на чотири групи:

- А – макулатура з високими паперотворними властивостями;
- Б – макулатура з середніми паперотворними властивостями;
- В – макулатура з низькими паперотворними властивостями;
- Г – макулатура, яка важко розпускається.

Макулатуру кожної групи залежно від складу, джерел надходження, кольору і здатності до розпускання поділяють на марки (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Марки макулатури [8, 36, 37]

Група	Марка	Склад
А	МС-1А-1	Відходи перероблення білого непігментованого паперу із 100-відсоткової біленої целюлози без друку та лініювання, без ламінованого, лакованого, парафінованого та іншого покриття та без просочення (синтетичними смолами, парафіном, воском, жироподібними речовинами тощо): папір для друку, малювання, писальний, креслярський, санітарно-гігієнічного призначення та інші види білого паперу без гільз
	МС-1А-2	Відходи перероблення білого паперу із 100-відсоткової біленої целюлози, зокрема пігментованого, без друку та лініювання, без ламінованого, лакованого, парафінованого та іншого покриття та без просочення (синтетичними смолами, парафіном, воском, жироподібними речовинами тощо): папір для друку, малювання, писальний, креслярський та інші види білого паперу без гільз
	МС-2А-1	Відходи перероблення білого паперу, різного за складом, з лініюванням або без нього (крім газетного), без пігментованого покриття, без покриття та просочення (синтетичними смолами, парафіном, воском, жироподібними речовинами тощо) та без ламінування
	МС-2А-2	Відходи перероблення всіх видів білого паперу, крім газетного, з лініюванням, кольоровою смужкою (площа друку не більше ніж 20 % площі поверхні), зокрема з пігментованим покриттям, але без покриття та просочення (синтетичними смолами, парафіном, воском, жироподібними речовинами тощо) та без ламінування
	МС-3А	Відходи виробництва, перероблення та використання продукції з небіленої целюлози:

		<p>- паперу:</p> <ul style="list-style-type: none"> • для гофрування (флютингу); • пакувального; • електроізоляційного без покриву та просочення; • шпагатного; • патронного; • мішкового; • основи абразивного; • основи для липкої стрічки; <p>- картону:</p> <ul style="list-style-type: none"> • для плоских шарів гофрованого картону (крафт-лайнера) та інших видів; • перфокарт; • паперового шпагату та інших видів, <p>Відходи виробництва паперових невологоміцних мішків (без бітумованого просочення, прошарку й армованих шарів)</p>
	МС-4А	Використані паперові невологоміцні мішки (без бітумованого просочення, прошарку й армованих шарів)
Б	МС-5Б-1	Відходи виробництва, перероблення та використання гофрованого картону та гофротара з біленої целюлози
	МС-5Б-2	Відходи виробництва та перероблення гофрованого картону різного сировинного складу та гофротара, яка не була у використанні
	МС-5Б-3	Гофрокартон і гофротара всіх видів з друком та без нього після використання
	МС-6Б-1	Відходи перероблення картону з біленої целюлози без друку
	МС-6Б-2	Відходи перероблення картону з біленої целюлози з чорно-білим та кольоровим друком
	МС-6Б-3	Відходи перероблення та використання картону всіх видів (крім електроізоляційного з просоченням і покривом, покрівельного та взуттєвого), зокрема з чорно-білим та кольоровим друком
	МС-7Б-1	Відходи виробництва поліграфічної галузі: обрізки, книжки, журнали, брошури, проспекти, каталоги та інші види продукції без оправ; нереалізовані книжки, журнали, брошури, проспекти, каталоги, блокноти, зошити, записні книжки, плакати та інші види друкованої продукції і паперових білових товарів, які видано на білому папері, крім газетного, з однофарбовим і кольоровим друком, без твердої приклеєної оправ, палітурок, обкладинок і корінців
	МС-7Б-2	Використані книжки, журнали, брошури, проспекти, каталоги, блокноти, зошити, записні книжки, плакати та

		інші види друкованої продукції і паперово-білових товарів, які видано на білому папері, крім газетного, з однофарбовим та кольоровим друком, без твердої приклеєної оправы, палітурок, твердих обкладинок і корінців
В	МС-8В-1	Відходи перероблення газетного паперу без друку
	МС-8В-2	Відходи газетного паперу з друком і нереалізовані тиражі газет
	МС-8В-3	Газети, що були у використанні
	МС-9В	Паперові та картонні гільзи, шпулі, втулки (без стрижнів і корків, без покриву та просочення)
	МС-10В	Литі вироби з паперової маси, яйцетара
	МС-11В	Відходи перероблення та використання картону і паперу різноманітних видів та кольорів, окрім чорного та коричневого: санітарно-гігієнічного призначення, обкладинкового, світлочутливого, зокрема задрукованого на апаратах розмножувальної техніки або принтерах, афішного, шпалерного (без покриву), пачкового, шпульного, фільтрувального тощо
Г	МС-12Г	Відходи виробництва, перероблення та використання паперу, картону та гофрокартону з просоченням і покривом, охоплюючи вологоміцні, ламіновані, проклеєні спеціальними клеями; паперові мішки, виготовлені з паперу зазначених видів; електроізоляційний папір і картон з просоченням та покривом, шпалери з покривом, книжки, журнали, надруковані на лакованому папері
	МС-13Г	Відходи виробництва, перероблення та використання паперу та картону чорного і коричневого кольорів, папір копіювальний, папір для обчислювальної техніки, папір пігментований і ґрунтований, покрівельний картон тощо
	МС-14Г	Відходи банкотного паперу і банкнот, зношені банкноти
<p>Примітка 1. За погодження зі споживачем у складі макулатури марки МС-4А допустима наявність паперових мішків з-під , каоліну, цементу, соди, азбесту, гіпсу, мінеральних добрив та інших нетоксичних продуктів без залишку речовин.</p> <p>Примітка 2. За погодження зі споживачем у складі макулатури марок МС-5Б-2 та МС-5Б-3 допустима наявність етикеток, торговельних ярликів і паперової липкої стрічки, які важко відокремлюються, крім полімерних стрічок.</p>		

5. Напівцелюлозні напівфабрикати (рис. 1.6) (термомеханічна маса, хімічно-термомеханічна маса) використовуються обмежено, переважно для середніх шарів гофрокартону, проте можуть вводитися у композицію лайнера

для підвищення об'ємності і жорсткості при зниженій густині [ISO 5269-2:2018].



Рис. 1.6 – Напівцелюлозні напівфабрикати

До складу маси для виробництва лайнера вводять функціональні добавки, які покращують технологічні властивості та якість готового продукту.

Найбільш поширеними функціональними добавками у виробництві картону-лайнера є:

- Крохмальні клеї та модифікувальні речовини (нативний, окиснений або модифікований кукурудзяний крохмаль). Вони підвищують внутрішнє зчеплення волокон, опір продавлюванню і стисканню.
- Алюмінієві та поліамід-епіхлоргідринові смоли, які покращують вологотривкість і міцність при підвищеній вологості.
- Наповнювачі (каолін, тальк, діоксид титану), що забезпечують гладкість і білизну поверхні.
- Ретенційні та дренажні агенти, які оптимізують формування полотна на сітці папероробної машини.

Згідно з даними асоціації “УкрПапір” та Державної служби статистики України, частка макулатури у структурі сировини для картонно-паперової промисловості України перевищує 85 %, що відповідає світовим тенденціям сталого розвитку [5, 6]. Водночас дефіцит високоякісних сортів макулатури призводить до необхідності імпорту частини вторинної сировини з країн ЄС.

Отже, сучасне виробництво картону-лайнера базується переважно на макулатурній сировині з домішкою первинної целюлози, що забезпечує баланс між механічною міцністю, гладкістю та економічністю. Використання модифікованого кукурудзяного крохмалю як добавки до маси або клею є перспективним напрямом підвищення якості лайнера, особливо в умовах збільшення частки вторинних волокон у композиції.

1.3. Аналіз використання модифікувальних добавок у виробництві картону-лайнера

Модифікувальні добавки в паперово-картонному виробництві виконують кілька ключових функцій: покращують зв'язок між волокнами, підвищують поверхневу міцність і гладкість, зменшують поглинання вологості та покращують утримання наповнювачів у паперовому полотні. Для картону-лайнера особливу роль відіграють ті модифікувальні добавки, які підвищують міцність під час стискання, опір продавлюванню і кращу адгезію шарів у гофрованому матеріалі. На практиці використовують як природні полімери (модифіковані крохмалі, пектиноподібні суміші), так і синтетичні сполуки (латекси, полімерні дисперсії) та нанокompозити [11].

Найпоширеніші модифікувальні добавки для картону-лайнера:

1. Крохмальні реагенти (нативні та модифіковані: катионізовані, оксидовані, преджелатинізовані) – застосовуються у масу для кінцевої гідратації, як поверхневий розчин та як компонент клеїв для склеювання шарів. Катионні крохмалі ефективні в умовах використання макулатури, бо їх позитивний заряд сприяє адсорбції на аніонних волокнах і підвищенню утримання тонкодисперсних частинок [9].

2. Дисперсійні полімери (латекси, ПВА-дисперсії) – застосовуються для підвищення вологоміцності та як покриття для зовнішніх шарів; комбінування латексу і крохмалю дозволяє отримати синергетичний ефект: підвищення вологостійкості і міцності під час стискання без значного втручання в технологічний процес [12].

3. Крохмаль-модифіковані наповнювачі – дають змогу підвищити вміст наповнювачів (каолін, карбонат кальцію) без значного погіршення міцності, завдяки кращій адгезії наповнювача з волокнами [12].

4. Нанодобавки і біомодифікатори (нанофібрильована целюлоза, лінгноцелюлозні частинки, функціоналізовані наночастинки) – використовуються для локального зміцнення поверхні та зменшення водопоглинання [10].

У виробництві картону-лайнера найбільше застосовують різні модифікації крохмалю. Їх поділяють на фізичні, хімічні та ферментативні:

- Катионізація – введення позитивно заряджених груп (цикламін, гліцидилтриметиламоній тощо) підвищує адсорбцію крохмалю на аніонних волокнах та покращує утримання тонкодисперсних частинок. Катионні крохмалі істотно знижують BOD стічних вод і сприяють кращій ретенції [9].

- Окиснення – зменшує в'язкість за певної молекулярної маси, покращує розчинність і дає кращу фільтр-кушонну активність; окисдовані крохмалі використовуються як поверхневі закріплювачі.

- Преджелатинізація та фізичні методи (екструдовані, барабан-висушені) – забезпечують холоднорозчинні крохмалі, які легко використовувати на форматні листи або як сухі порошкові домішки; зручні для оперативного регулювання в'язкості робочих розчинів.

- Графт-полімеризація та комбінації з полімерними дисперсіями – дають можливість саме для лайнера отримати комбіновані властивості: суху міцність від крохмалю та вологоміцність від полімеру [11].

Застосування натурального крохмалю як зміцнювального агента ускладнене із-за зростаючої в'язкості його розчину та схильності до

ретроградації. Тому на практиці переважно застосовують модифіковані крохмалі. Основні види кукурудзяного крохмалю наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Види модифікованих кукурудзяних крохмалів для виробництва картону-лайнера

№ з/п	Вид модифікованого крохмалю	Марка/Постачальник	Ступінь заміщення (DS)	Сфера застосування	Рекомендована концентрація, %	Примітка / стандарт
1	2	3	4	5	6	7
1	Катионізований кукурудзяний крохмаль	<i>CATO® 75, Raisio (Фінляндія); Amisol® CS 310, Roquette (Франція)</i>	0,035–0,045	Wet-end (для маси з макулатури)	0,6–1,0	Згідно TAPPI T 653, підвищення SCT на 8–12 %
2	Окиснений кукурудзяний крохмаль	<i>AmylOx® 200, Cargill (США)</i>	–	Surface sizing / size-press	1,5–2,5	TAPPI UM 200, покращення гладкості на 15–20 %
3	Преджелатинізований (екструзійно оброблений)	<i>Becogel® 150, Ingredion (Нідерланди)</i>	–	Surface sizing, cold-soluble	1,0–2,0	Використовується без варіння; покращує рівномірність плівки
4	Крохмаль-графт (PVA-крохмаль)	<i>EcoBind™ S-25, Chemstar (США)</i>	DS ≈ 0,02 (PVA дисперсія)	Покриття та ламінування	0,8–1,5	TAPPI T 460; значне підвищення вологоміцності
5	Ферментативно модифікований крохмаль	<i>Starlight® E-320, Lyskeby (Швеція)</i>	–	Wet-end, легка регуляція в'язкості	0,5–0,8	Екологічно безпечна альтернатива окисдованим крохмалям
6	Крохмаль-інкапсульовані наповнювачі (CaCO ₃)	<i>StarchBond® Ca+, TAPPI R&D pilot</i>	–	Wet-end, високий рівень наповнення	1,0–1,2	TAPPI T 801; зберігає SCT при 20 % CaCO ₃

Під час модифікування відбувається гідроліз (розрив) глюкозидних зв'язків, внаслідок чого зменшується молекулярна маса полісахаридів крохмалю і знижується густина його дисперсії [23]. Модифіковані крохмалі

варять в чанах періодичної роботи із прямим паровим нагріванням або в парових ємностях безперервної дії, що працюють під тиском, із вмістом сухої речовини на 30...50 % більше робочої концентрації. Найкращим режимом для більшості типів крохмалів є варіння в чанах періодичної дії за температури 95...100 °С, тривалість варіння 10...20 хв, а в ємностях безперервної дії варіння ведеться за температури 120...140 °С, тривалість варіння – 30...45 с [24].

Високов'язкі сорти крохмалю застосовуються за концентрації 4...8 %, а низько в'язкі – 6...15 %. Модифікований крохмаль одержують шляхом реакції крохмалю з алкенілянтарним ангідридом, переважно 1-октенілсукцинатом. Міра заміщення модифікованого крохмалю має бути у межах 0,005...0,1. Співвідношення зміненого і катіонного крохмалю можна варіювати у межах 30/70...80/20. Як катіонні крохмалі використовують третаміноалкілові етерикрохмалі, які отримують взаємодією крохмалю з диалкіламіно алкілгалоїдами у лужному середовищі. Властивості паперів, які отримують, суттєво покращуються у разі додавання у суміш 0,5...5,0 % (від маси крохмалю) солі алюмінію. Це можуть бути тригалогеніди алюмінію, галуни, ацетат. Суміш крохмалів наносять на папір у кількості 1,5...5 % від маси сухого паперу [25].

Крохмаль окрім зміцнювальних, має також флокулювальні властивості, це дозволяє краще утримувати дрібні волокна і наповнювачі у паперовій масі. Поряд зі зростанням механічної міцності катіонний полікомплекс крохмалю дозволяє підвищити опір до відщеплення [26].

Окрім згаданих вище змін крохмалю, застосовують крохмалофосфати. Моноетери крохмалів і фосфатів отримують, нагріваючи суху суміш крохмалю та водорозчинної фосфатної солі. Готовий монофосфатний крохмаль використовують для надання однорідності паперовій масі під час змішування, для отримання паперу з низькою еластичністю і з підвищеною міцністю на розривання.

Катіонні крохмалі є, можливо, найбільш своєрідним типом похідних крохмалю, які нещодавно здобули значне поширення. Їх широке промислове застосування зумовлене спорідненістю до негативно заряджених субстратів,

таких як целюлоза і деяких синтетичних волокон, водних суспензій мінералів, слизу і біологічно-активних макромолекул. Катіонні крохмалі використовуються як внутрішньо-масні зв'язувальні речовини у паперовій промисловості. Механізм, за яким катіонні крохмалі забезпечують зчеплення волокон між собою, повністю нез'ясований, але можна припустити, що у разі застосування катіонних крохмалів, внаслідок притягування іонів спостерігається тісніший контакт між поверхнею фібрильних ниток і гідроксилом крохмалю, а це збільшує кількість утворених водневих зв'язків, які сприяють покращенню міцності [27].

Є два основні підходи введення крохмалю в технологічний процес виробництва лайнера:

1. “Wet-end application” (додавання у волокнисту масу на Fourdrinier або аналогічну машину) – забезпечує глибоке зміцнення структури полотна, підвищує внутрішню зв'язність; проте вимагає контролю в'язкості та ретенції, адже частина крохмалю може залишатися у стоці [12].

2. “Size-press” / “Surface sizing” – нанесення крохмального розчину на поверхню полотна з метою підвищення поверхневої міцності, зменшення пористості та покращення друкованих властивостей. Для лайнера “surface sizing” є критичним для забезпечення гладкості та контролю поглинання фарб.

Остання практика також включає “spray starch” – розпилення крохмалю в зоні формування, що дозволяє комбінувати переваги “wet-end” та “size-press” без великої додаткової сушильної навантаженості [12].

Емпіричні та лабораторні дослідження показують такі основні ефекти:

- Підвищення опору продавлюванню (SCT) – катіонні та преджелатинізовані крохмалі підвищують міцність міжфібрильних зв'язків.

- Збільшення жорсткості при збереженні низької щільності – застосування крохмалю разом із наповнювачами (starch-encapsulated fillers) дозволяє зберегти міцність при більшому вмісті наповнювача, що економить волокно [12].

- Вологоміцність – саме по собі модифікування крохмалю не дає великого підвищення вологоміцності; для цього використовують комбінації крохмалю з латексом або водо-репелентними агентами [12].

Модифіковані крохмалі мають низку переваг з екологічної точки зору: відновлюваність сировини, біорозкладність і можливість зниження споживання синтетичних полімерів. Однак хімічні методи модифікування (натрієві солі, епіхлоргідринні з'єднання тощо) вимагають контролю за залишковими продуктами й стічними водами; сучасні дослідження наголошують на розробці “зелених” методів модифікування (ферментативні, фізико-хімічні без агресивних реагентів).

Для лайнера, що містить велику частку макулатури, перевагу слід віддавати катионізованим крохмалю у “wet-end” та “predgelatinized” крохмалю на “size-press” для оптимізації утримання наповнювачів і підвищення поверхневої міцності [9]. Комбіноване використання “starch-encapsulated fillers” дозволяє підвищити долю наповнювачів без значної втрати механічних властивостей, що економічно доцільно при високих цінах на волокно [12]. Для підвищення вологоміцності рекомендується комбінувати крохмаль з дисперсійними полімерними добавками (латекс) або застосовувати тонкоплівкові покриття після “size-press” [12].

Варто оцінювати екологічний профіль модифікування (залишки реагентів, BOD у стічних водах) та віддавати перевагу методам із мінімальним використанням шкідливих реагентів (ферментативні модифікації, фізичні методи).

1.4. Висновки до розділу

Потреба у виробництві гофрокартону в Україні залишається стабільно високою. Основною проблемою українського виробництва є нестача якісної вторинної сировини та висока енергомісткість процесу. Виробництво картону-лайнера спирається переважно на макулатурну целюлозу (recycled linerboard), частка якої у структурі сировини в ЄС та Україні перевищує 85 %. Основними

волокнистими компонентами є відходи паперової тари, гофрокартону, а також невелика частка первинної сульфатної целюлози для покращення фізико-механічних властивостей.

Для забезпечення потрібної вологоміцності, жорсткості та рівномірності поверхні, у масу вводять модифікувальні добавки на основі крохмалю, поліакриламідів і латексів. Серед них найбільш поширеними є катионізовані кукурудзяні крохмалі з $DS \approx 0,03-0,05$ для “*wet-end*” і окиснені крохмалі для “*surface sizing*” (1,5–2,5 % до маси сухих волокон).

Сучасний розвиток паперової промисловості орієнтований на ресурсоефективність і повторну переробку. Картон-лайнер із макулатурної сировини є одним із найперспективніших сегментів вторинної целюлозно-паперової галузі. Технологічні дослідження спрямовані на покращення структурно-механічних властивостей картону шляхом оптимізації рецептур модифікованих крохмальних добавок. Ефективність процесів проклеювання та зв'язування волокон значною мірою залежить від ступеня заміщення (DS) і молекулярної маси модифікованого крохмалю.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення картону-лайнера.

Предметом дослідження є вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні показники якості картону-лайнера.

Мета роботи – з'ясувати фізико-механічні показники якості картону-лайнера, виготовленого з додаванням модифікованого кукурудзяного крохмалю. Для досягнення поставленої мети було сформовано та вирішено наступні завдання:

1. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на масу картону-лайнера.
2. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на абсолютний опір продавлювання картону-лайнера.
3. Дослідити вплив різних видів та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку.

Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріали та обладнання

Для виконання експериментальних досліджень було використано макулатурну волокнисту масу марок МС-5Б, типову для виробництва картону-лайнера в Україні. Як модифікувальні добавки застосовано чотири види кукурудзяного крохмалю (табл.2.1.)

Таблиця 2.1 – Види крохмалю

№з\п	Вид крохмалю	Хімічна характеристика	Позначення	Рекомендована концентрація, % до сухої маси волокна	Основна сфера застосування
1	Нативний крохмаль	Немодифікований, містить 27–28% амілози	S ₁	1.0–2.0	Наповнення у масі
2	Катіонний крохмаль	Ступінь заміщення 0.035–0.045 (С–Е4)	S ₂	1.5–2.5	Вологий кінець машини (“wet end”)
3	Окиснений крохмаль	Вміст карбонільних груп 0.4–0.6%	S ₃	2.0–3.0	Поверхнєве проклеювання (“size press”)
4	Ацетильований крохмаль	Ступінь ацетильовання 2.5–3.5%	S ₄	2.0–3.0	Комбіноване застосування

Волокнисту суспензію готували у лабораторному гідропульпері ємністю 20 л за концентрації 3%. Згущення здійснювали на ситі з діаметром отворів 0,25 мм. Вологість маси перед формуванням зразків становила 60–62%.

Обладнання:

- папероробна машина №3;
- size Press модуль для нанесення крохмального розчину;
- електросушильна шафа СНОЛ 3,5.3,5.3,5/3 – ІЗ;
- прилад для випробування картону на продавлювання 8036R;
- прес випробувальний УСГ-1-2;
- прилад SCT-tester;
- вага електронна AD 500;
- мікрометр;

- термометр;
- рН-метр.

2.2. Методика виготовлення зразків картону-лайнера

Зразки картону виготовляли у два шари, моделюючи структуру промислового картону-лайнера (верхній та нижній). Шари формувалися з макулатурної маси марки МС-5Б із введенням крохмальної добавки згідно таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Режим виготовлення зразків картону-лайнера

№з/п	Вид крохмалю	Дозування, %	Температура сушіння, °С	Поверхнева щільність, г/м ²
1	S ₁ – нативний	2.0	130	175
2	S ₂ – катіонний	2.0	130	175
3	S ₃ – окиснений	2.5	130	175
4	S ₄ – ацетильований	3.0	130	175

Картон виготовляли на папероробній машині №3 (рис. 2.1) за відповідною технологічною схемою (додаток А).



Рис. 2.1 – Папероробна машина

2.3. Визначення показників якості картону-лайнера

2.3.1. Визначення маси картону-лайнера за площиною

Маса картону-лайнера, виражена в грамах на квадратний метр ($\text{г}/\text{м}^2$), є одним з основних показників якості паперово-картонних матеріалів, що характеризує кількість волокнистої сировини, яка припадає на одиницю площі матеріалу. Цей показник безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості картону, зокрема міцність на продавлювання, жорсткість, опір стисканню кільця, а також на споживчі та експлуатаційні характеристики гофрокартону, у виробництві якого лайнер використовується як покривний шар.

У промисловості картон-лайнера зазвичай виготовляють у діапазоні мас $120\text{--}250 \text{ г}/\text{м}^2$ залежно від призначення упаковки, вимог до міцності та економічних чинників. У лабораторних дослідженнях контроль і стабільність маси є критично важливими, оскільки навіть незначні відхилення можуть суттєво впливати на результати інших механічних випробувань.

У контексті даної магістерської роботи визначення маси картону-лайнера є необхідним етапом для:

- оцінки впливу модифікованого кукурудзяного крохмалю на утримання волокна та наповнювачів;
- коректного порівняння механічних показників різних зразків;
- підтвердження відтворюваності лабораторних умов формування картонних листів.

Визначення маси паперу та картону здійснювалося відповідно до міжнародних та національних стандартів, зокрема згідно з ДСТУ 2297 “Напівфабрикати волокнисті, папір та картон. Метод визначення маси продукції площею 1 м^2 ”

Вирізали зразок картону розміром $100 \times 100 \text{ мм}$ (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Прилад для розкроювання зразків картону

Після вирізання зразків картону із рулону, їх зважували з точністю до 0,001 г.(рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Момент зважування зразків картону

Масу картону-лайнера за площиною (Basis Weight) у $\text{г}/\text{м}^2$ визначали з точністю до 0,1 г за формулою:

$$G = \frac{m}{A}, \quad (2.1)$$

де G – маса за площиною, $\text{г}/\text{м}^2$;

m – маса зразка, г;

A – площа, м^2 .

Цей показник інтегрує в собі вплив таких чинників, як:

- ступінь розмелювання волокна;
- ефективність утримання волокон і дрібних фракцій;
- рівномірність формування паперового полотна;
- застосування хімічних добавок, зокрема крохмалів.

Для кожного варіанта досліджу (контрольний зразок та зразки з додаванням різних типів і концентрацій крохмалю) проводили серію з не менше ніж 10 паралельних вимірювань. Результати отриманих значень усереднювали за 10 зразками.

Додавання модифікованого кукурудзяного крохмалю, особливо катіонного та окисненого, як правило, сприяє підвищенню маси картону при однакових умовах формування. Це пояснюється покращенням утримання волокон і дрібнодисперсних частинок за рахунок електростатичної взаємодії та підвищенням зв'язувальної здатності волокнистої структури.

Таким чином, контроль маси є необхідним для коректної інтерпретації змін механічних властивостей, оскільки зростання опору продавлюванню або стисканню кільця може бути частково зумовлене саме збільшенням маси, а не лише модифікуванням міжволоконних зв'язків.

Методика визначення маси картону-лайнера є простою, відтворюваною та стандартизованою, що дозволяє використовувати її як базовий контрольний етап у дослідженнях впливу хімічних добавок. Дотримання стандартних умов кондиціонування та достатньої кількості повторних вимірювань забезпечує високу достовірність отриманих результатів.

2.3.2. Визначення абсолютного опору продавлюванню картону-лайнера

Абсолютний опір продавлювання є одним із ключових фізико-механічних показників якості картону-лайнера, що характеризує його здатність протидіяти локальному навантаженню, прикладеному перпендикулярно до площини аркуша. Даний показник має вирішальне значення для оцінювання

експлуатаційної надійності гофрованого картону, зокрема його опору до механічних пошкоджень під час штабелювання, транспортування та зберігання пакувальної продукції.

Опір продавлювання відображає комплексний вплив таких факторів, як:

- маса картону (г/м^2);
- ступінь міжволоконного зв'язування;
- рівень проклеювання волокон;
- наявність та тип модифікувальних добавок, зокрема крохмалю;
- структура та орієнтація волокон.

У практиці целюлозно-паперової промисловості визначення опору продавлювання є обов'язковим етапом контролю якості картонів для гофровиробництва та регламентується міжнародними й національними стандартами.

Визначення абсолютного опору продавлювання картону-лайнера проводять відповідно до ДСТУ ISO 2759:2022 – Картон. Визначення опору продавлюванню, що забезпечує відтворюваність результатів та їх порівняння з міжнародними даними.

Метод визначення абсолютного опору продавлювання ґрунтується на вимірюванні максимального гідравлічного тиску, необхідного для руйнування зразка картону шляхом його розтягування в усіх напрямках площини під дією еластичної мембрани.

Під час випробування зразок картону фіксується між двома кільцевими затискачами, після чого до нього прикладається рівномірно зростаючий тиск за допомогою гумової діафрагми. У момент руйнування фіксується максимальне значення тиску, яке й приймається за абсолютний опір продавлювання.

Руйнування матеріалу при цьому має складний характер і зумовлене одночасним:

- розривом міжволоконних зв'язків;
- деформацією та розривом волокон;
- локальним зсувом волоконних шарів.

Для визначення абсолютного опору продавлювання використовували спеціалізований прилад 8036R (рис. 2.4), котрий складається з таких основних вузлів:

- система створення тиску;
- еластична гумова мембрана;
- верхній та нижній затискні кільця;
- датчик тиску.

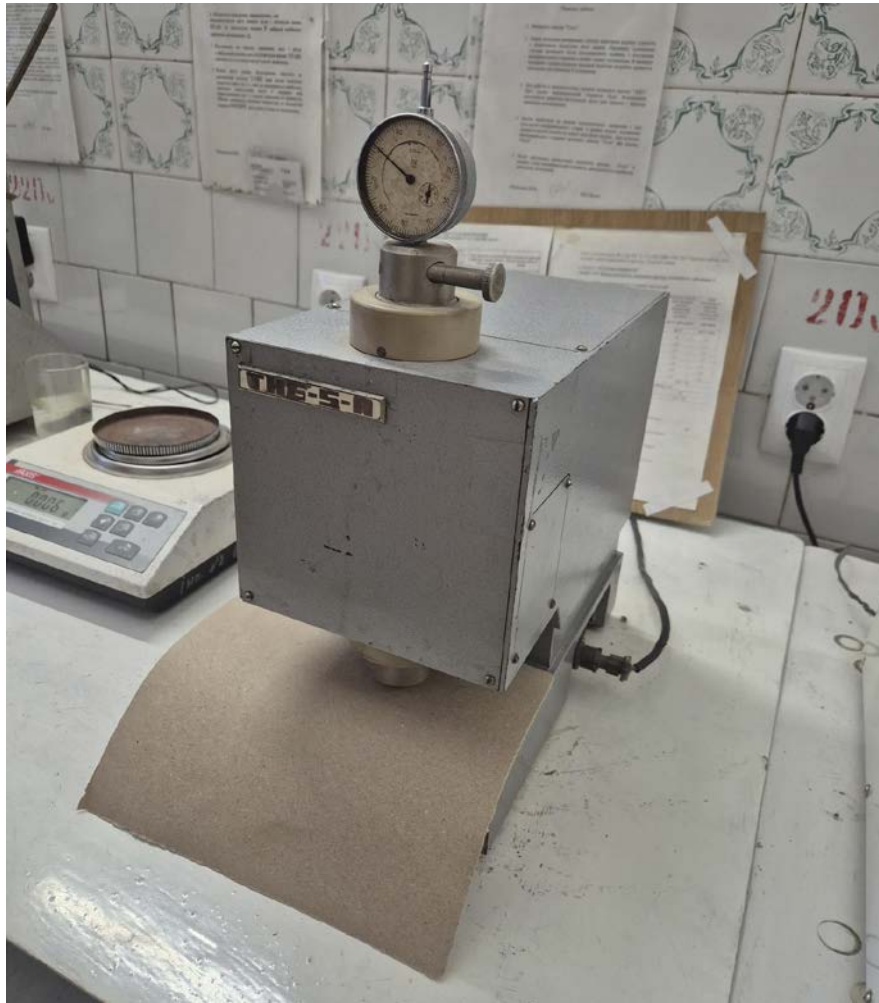


Рис. 2.4 – Прилад для випробування картону на продавлювання 8036R

Основні технічні характеристики приладу:

- діапазон вимірювання тиску: до 6000 кПа;
- похибка вимірювання: не більше ± 1 %;
- швидкість наростання тиску: (170–220) кПа/с.

Перед проведенням випробувань прилад калібрували відповідно до інструкцій виробника та вимог стандартів.

Зразки картону-лайнера для визначення опору продавлювання готували з урахуванням таких вимог:

- форма зразка – квадрат або круг, розміром не менше 100×100 мм;
- кількість випробувань – не менше 10 для кожного варіанта;
- відсутність видимих дефектів (заломів, тріщин, неоднорідностей);
- випробування проводили окремо для лицевого та зворотнього боку, якщо це передбачено програмою досліджень.

Визначення абсолютного опору продавлюванню картону-лайнера проводили за температури 23±1 °С та відносної вологості 50±2 %.

Випробування проводили у такій послідовності:

- Підготовлений зразок встановлювали між затискними кільцями приладу.
- Зразок фіксували таким чином, щоб уникнути ковзання під час навантаження.
- Вмикали систему та плавно підвищували тиск.
- Фіксували максимальне значення тиску в момент руйнування зразка.
- Результат записували у протокол випробувань.
- Процедуру повторювали для всіх зразків серії.

Після завершення випробувань проводили візуальний аналіз характеру руйнування картону.

Абсолютний опір продавлюванню картону-лайнера визначали у кПа за формулою:

$$B = \frac{P}{A}, \quad (2.2)$$

де B – абсолютний опір продавлювання, кПа;

A – площа поверхні, м²;

P – тиск продавлювання, Н.

Введення модифікованого кукурудзяного крохмалю в композицію картонної маси або його нанесення на поверхню листа призводить до зростання абсолютного опору продавлювання за рахунок підвищення міцності міжволоконних зв'язків; зменшення пористості структури та формування

додаткових водневих зв'язків між волокнами і крохмальними макромолекулами.

Особливо ефективним є використання катіонного та окисненого крохмалю, які забезпечують кращу адсорбцію на волокнах целюлози та більш рівномірний розподіл у структурі картону.

Метод визначення абсолютного опору продавлювання є надійним і інформативним способом оцінювання міцнісних характеристик картону-лайнера. Його застосування дозволяє кількісно оцінити ефективність використання модифікованого кукурудзяного крохмалю та обґрунтувати оптимальні рецептури картонної маси для виробництва пакувальних матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

2.3.3. Визначення руйнівного зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку

Руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку є одним із ключових фізико-механічних показників якості картону-лайнера, що безпосередньо характеризує його здатність чинити опір стисканню у площині аркуша. Даний показник має особливе значення для пакувальної промисловості, оскільки він тісно корелює з експлуатаційними властивостями гофрокартону, зокрема з показниками міцності транспортної тари на стискання (Box Compression Test, BCT).

Метод випробування ґрунтується на визначенні максимального зусилля, яке витримує зразок картону, сформований у вигляді кільця, при прикладанні осьового стискального навантаження до моменту руйнування. Метод є стандартизованим і регламентується міжнародними та національними нормативними документами, зокрема стандартами TAPPI T822 “Ring Crush of Paperboard”, ISO 12192 “Paper and board — Compressive strength — Ring crush method”, а також відповідними положеннями стандартів ДСТУ. Випробовували у пресі УСГ-1-2 (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Прес випробувальний УСТ-1-2

Суть методу полягає у тому, що прямокутний зразок картону відповідних розмірів згортають у кільце та встановлюють у спеціальне випробувальне кільцеве пристосування. Далі до зразка прикладають стискальне навантаження у напрямку, перпендикулярному до площини кільця, з постійною швидкістю деформації. Фіксується максимальне значення сили, за якої відбувається втрата стійкості або механічне руйнування зразка.

Отримане значення руйнівного зусилля використовується для порівняльної оцінки впливу різних типів модифікованого кукурудзяного крохмалю (нативного, катіонного, окисненого, ацетильованого) та їх концентрацій (1 % і 2 %) на міцнісні властивості картону-лайнера.

Для проведення випробувань використовується універсальна випробувальна машина УСТ-1-2, оснащена: тензометричним датчиком сили з межею вимірювання не менше 5 кН; плоскими стискальними плитами з високою жорсткістю та системою реєстрації навантаження та деформації.

Кільцеве пристосування (Ring Crush Holder) (рис. 2.6.):

- металева форма для фіксації кільця;
- внутрішній діаметр $49,3 \pm 0,1$ мм (відповідно до стандарту TAPPI).



Рис. 2.6 – Прилад для підготовки зразка

Ріжучий інструмент (рис.2.2).

Кондиціонувальна камера для витримування зразків за стандартних умов.

Штангенциркуль або мікрометр для контролю розмірів зразків.

Визначення руйнівного зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку картону-лайнера проводили за температури 23 ± 1 °C та відносної вологості 50 ± 2 %.

Зразки для випробування вирізали із картону-лайнера у машинному напрямку (MD) або поперечному напрямку (CD), залежно від цілей дослідження. У даній роботі випробування проводяться у поперечному напрямку.

Розміри зразків: довжина: $152 \pm 0,5$ мм; ширина: $12,7 \pm 0,1$ мм. Кількість зразків для кожного варіанта (контроль, 1 % і 2 % крохмалю кожного типу) становить не менше 10 для забезпечення статистичної достовірності результатів. Підготовлений зразок згортали у кільце таким чином, щоб краї щільно прилягали один до одного без перекосів. Кільце встановлювали у кільцеве пристосування випробувальної машини (рис.2.5).

Випробувальні плити приводили у контакт зі зразком без попереднього навантаження. Навантаження прикладали зі сталою швидкістю переміщення траверси 12,5 мм/хв. Процес стискання тривав до моменту різкого зниження навантаження, що відповідає руйнуванню або втраті стійкості зразка F.

Руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку визначали в Н/мм за формулою:

$$R = \frac{F}{L}, \quad (2.3)$$

де R – опір стисканню, Н/мм;

F – руйнівне зусилля, Н;

L – ширина смуги, мм.

Руйнівне зусилля стискання кільця відображає комплексну дію:

- міцності міжволоконних зв'язків;
- жорсткості волокнистої структури;
- рівномірності розподілу крохмального шару;
- ступеня модифікування крохмалю та його взаємодії з целюлозними

волокнами.

Зростання показника RCT при введенні модифікованого кукурудзяного крохмалю свідчить про покращення адгезії між волокнами та підвищення структурної цілісності картону-лайнера.

Описана методика дозволяє об'єктивно оцінити вплив різних типів модифікованого кукурудзяного крохмалю та їх концентрацій на міцність картону-лайнера при стисканні в поперечному напрямку. Отримані результати є надійною експериментальною базою для подальшого аналізу ефективності застосування крохмалю у виробництві пакувальних матеріалів.

2.4. Статистична обробка результатів

Обробка даних проводилась з використанням стандартних статистичних методів (ТАРРІ Т1200). Для кожного показника розраховували середнє арифметичне, стандартне відхилення та довірчий інтервал.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

$$\Delta = t_{0,95} \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (2.6)$$

де \bar{x} – середнє значення;

s – стандартне відхилення;

Δ – довірчий інтервал;

$t_{0,95}$ – коефіцієнт Стьюдента при 95% довірчій ймовірності ($t = 2.262$ для $n = 10$).

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на масу картону

Маса картону (г/м^2) є одним із базових показників якості картонної продукції, що визначає її структурну рівномірність, щільність волоконної сітки, а також подальші механічні параметри – жорсткість, опір продавлюванню та міцність під час стискання кільця. Згідно ДСТУ 2297 “Напівфабрикати волокнисті, папір та картон. Метод визначення маси продукції площею 1 м^2 ”, маса є коректним інтегральним індикатором взаємодії волокнистих і зв’язувальних компонентів у структурі листа [13]. Згідно з технологічними вимогами [16], збільшення вмісту поверхневого або внутрішнього крохмального зв’язувального шару зазвичай призводить до покращення міжволоконних зв’язків; зменшення ступеня вимивання дрібних фракцій; збільшення маси сформованого листа за рахунок утримання волокна та наповнювача; підвищення рівномірності масорозподілу.

Модифікований кукурудзяний крохмаль (катіонний, окиснений, ацетильований) демонструє різний вплив на масу листа залежно від ступеня заміщення (DS), в’язкості та катіонності, що корелює з механізмами флокуляції та сорбції на поверхні волокон целюлози [17–19].

У даному дослідженні було досліджено вплив чотирьох типів кукурудзяного крохмалю – нативного, катіонного, окисненого та ацетильованого – на масу сформованого картону-лайнера. Випробування проводилось для стандартної концентрації крохмалю “wet-end” (1,0–2,0 % від маси абсолютно сухих волокон) та при гідродинамічних умовах, характерних для машин плоского формування.

Катіонний крохмаль, завдяки наявності чотирьох амонієвих груп, має високу спорідненість до негативно заряджених волокон целюлози. Це забезпечує більш ефективне закріплення крохмалю в товщині листа та мінімізацію втрат у воду [14]. У свою чергу, окиснений і ацетильований крохмаль проявляють нижчу молекулярну масу та підвищену розчинність, що

сприяє частковому “заповненню” пор листа й вирівнюванню поверхні. Результати досліджень наведено в додатку Б, а середні значення в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Середні значення маси картону залежно від виду крохмалю та його концентрації

Вид крохмалю	Середня маса, г/м ²	Приріст, г/м ²	Приріст, %
Нативний (NS) 1%	183	-	-
Нативний (NS) 2%	190,4	-	-
Катіонний (CS) 1%	186,6	3,6	1,93%
Катіонний (CS) 2%	196,7	13,7	6,96%
Окиснений (OS) 1%	184,6	1,6	0,87%
Окиснений (OS) 2%	188,5	5,5	2,92%
Ацетильований (AS) 1%	186	3	1,61%
Ацетильований (AS) 2%	190,6	7,6	3,99%

Залежність маси картону від виду та концентрації модифікованого крохмалю наведено на рис. 3.1 – 3.2.

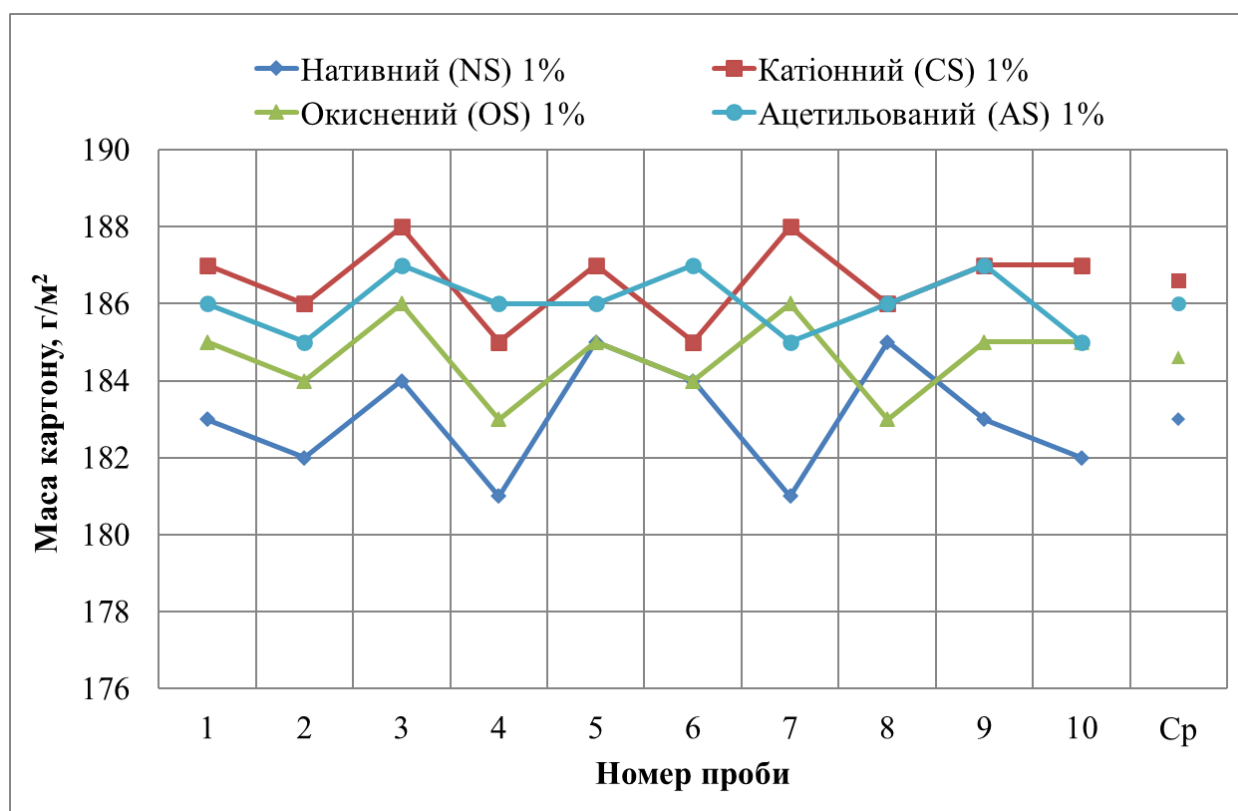


Рис.3.1 – Вплив 1 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на масу картону-лайнера

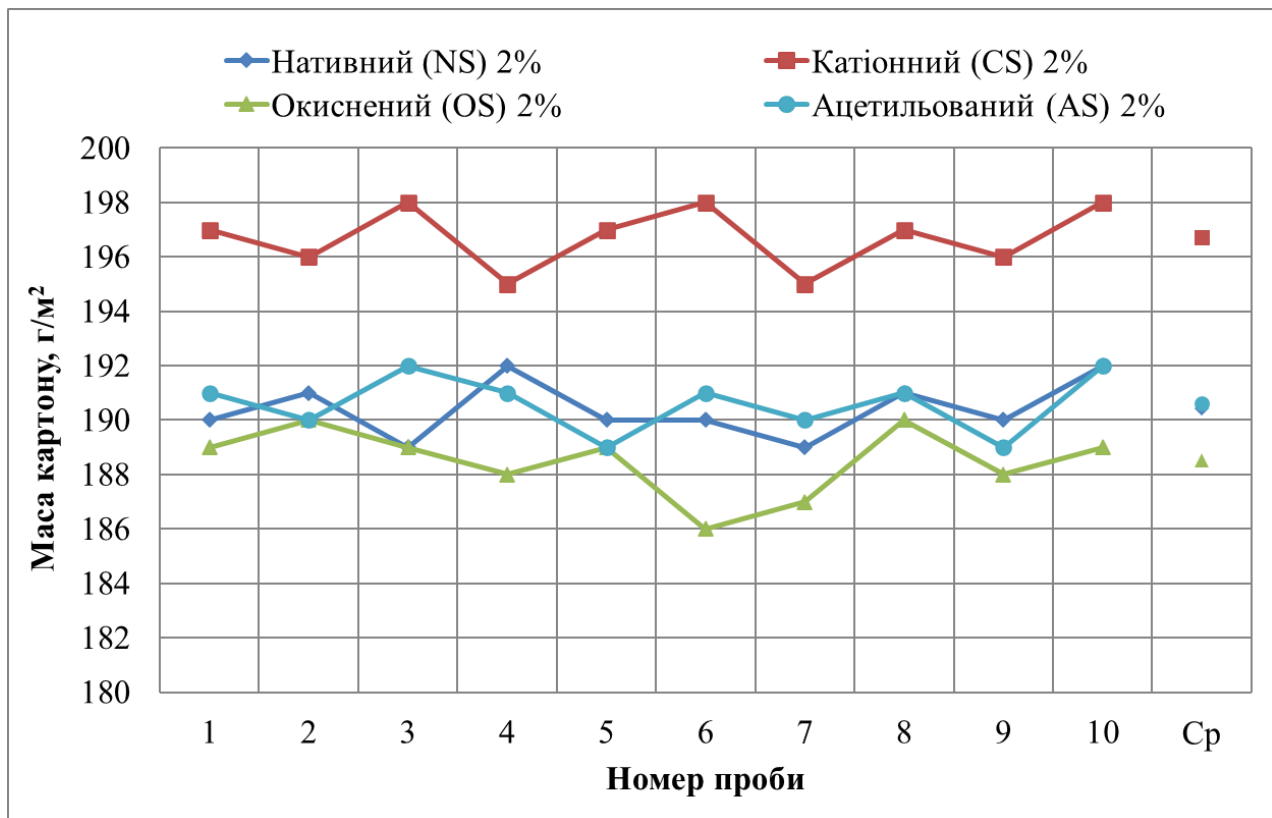


Рис.3.2 – Вплив 2 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на масу картону-лайнера

Як бачимо з рисунків 3.1 – 3.2 від модифікування кукурудзяного крохмалю та збільшення його концентрації веде до статистично значущого підвищення маси картону-лайнера (175 г/м²). З отриманих даних видно, що катіонний крохмаль (2%) дає найбільший приріст маси (~+6.96%), що логічно впливає з механізму електростатичної адсорбції катіонних полімерів на аніонних волокнах. Це підвищує втримування і сухий залишок у сформованому листі. Окиснений крохмаль 2% забезпечує значущий приріст (~+2.92%), його ефект корисний там, де потрібна краща проникність у пори та однорідність. Ацетильований крохмаль демонструє збалансований ефект ($\approx +3.99\%$) і водночас може покращувати водостійкість поверхні.

3.2. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на абсолютний опір продавлювання картону-лайнера

Абсолютний опір продавлювання (bursting strength, BS) є одним із базових показників якості картону-лайнера, що визначає його здатність

протистояти локальному навантаженню, яке викликає руйнування матеріалу в зоні концентрації напружень. У виробництві тарного картону цей показник є важливим, оскільки безпосередньо впливає на експлуатаційну придатність гофротари, здатність витримувати удар, тиск під час штабелювання та навантаження під час транспортування [20]. Механізм дії крохмалю в системі волоконного наповнювача пояснюється формуванням додаткових міжволоконних зв'язків водневого типу, а також зміцненням поверхневих шарів картону за рахунок структуроутворення після висихання.

Під час внесення крохмалю на стадії маси (“wet-end starch”) ефект зміцнення пов'язаний із підвищенням щільності формування листа та зменшенням мікродефектів структури. Натомість крохмаль гарячого поверхневого нанесення (“size press starch”) переважно покращує показники міцності на продавлювання, розрив і стискання за рахунок покращення роботи поверхневого шару картону [21].

Результати досліджень наведено в додатку В, а середні значення в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Середні значення абсолютного опору продавлюванню картону-лайнера при використанні різних видів та концентрації крохмалю

Вид крохмалю	Середній опір продавлюванню, кПа	Приріст, кПа	Приріст, %
Нативний (NS) 1%	375,5	-	-
Нативний (NS) 2%	389,6	-	-
Катіонний (CS) 1%	391,5	27,1	7%
Катіонний (CS) 2%	413,3	48,9	12%
Окиснений (OS) 1%	382,5	18,1	5%
Окиснений (OS) 2%	394,5	30,1	8%
Ацетильований (AS) 1%	388,5	24,1	6%
Ацетильований (AS) 2%	405,5	41,1	10%

Найвищий приріст абсолютного опору продавлюванню картону-лайнера забезпечив катіонний крохмаль (до +12 %), що узгоджується з відомими моделями адсорбції катіонних полімерів на целюлозному волокні.

Фізико-хімічний аналіз показує:

- Катіонний крохмаль (CS) має максимальний вплив завдяки сильній електростатичній взаємодії із аніонними групами целюлози.
- Окиснений крохмаль (OS) покращує продавлювання за рахунок меншої молекулярної маси і кращої проникності в структуру листа.
- Ацетильований (AS) забезпечує стабільне підвищення міцності завдяки модифікованій поверхневій енергії гранул і підвищеній адгезії.

Залежність між типом крохмалю та опором продавлюванню має нелінійний характер, що вказує на комбіновану природу зміцнення: підвищення щільності листа, зменшення макропор, формування додаткових міжволоконних зв'язків.

Залежність опору продавлюванню картону-лайнера від виду і концентрації модифікованого крохмалю наведено на рис. 3.3 – 3.4.

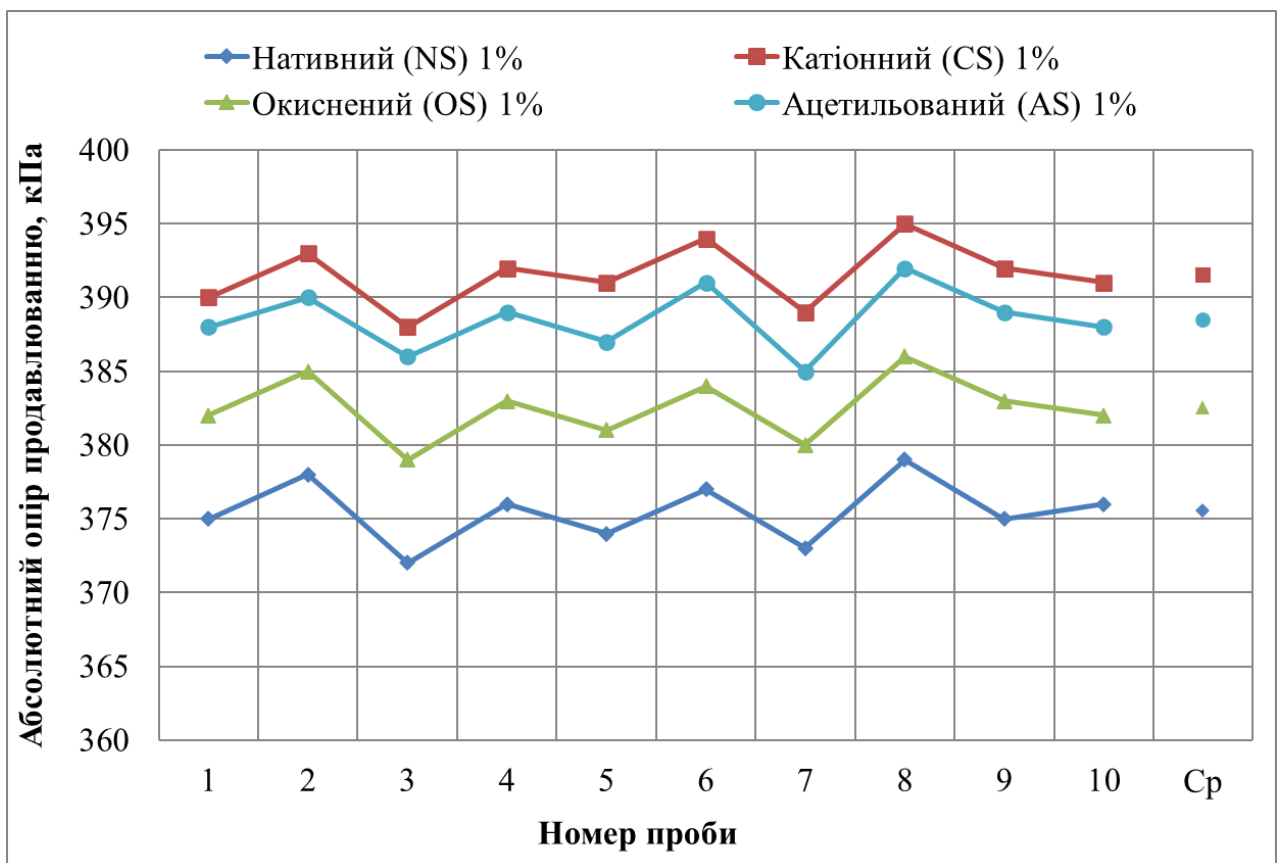


Рис. 3.3 – Вплив 1 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на опір продавлювання картону-лайнера

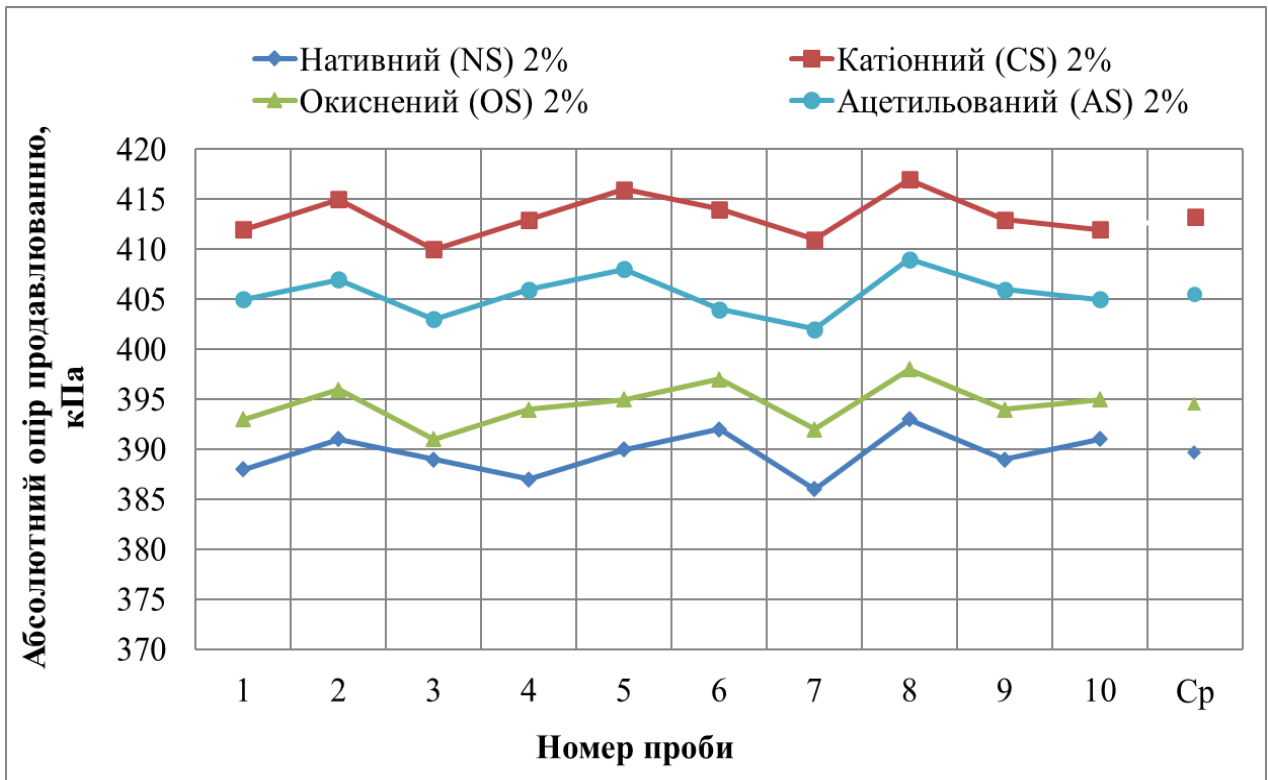


Рис. 3.4 – Вплив 2 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на опір продавлювання картону-лайнера

З отриманих даних видно, що катіонний крохмаль (2%) дає найбільший приріст опору продавлювання (~+12 %), що логічно впливає з механізму електростатичної адсорбції катіонних полімерів на аніонних волокнах. Це підвищує втримування і сухий залишок у сформованому листі. Окиснений крохмаль 2% забезпечує приріст (~+8 %). Ацетильований крохмаль демонструє збалансований ефект ($\approx +10$ %) і водночас може покращувати водостійкість поверхні. Катіонний крохмаль 1 і 2 % концентрації адсорбуються на поверхні целюлозного волокна, нейтралізують негативний заряд та сприяють більш ефективному “склеюванню” контактних зон волокон; це підвищує опір продавлюванню (BS). Окислені та ацетильовані крохмалі змінюють проникність і плівкоутворення, що також позитивно впливає на BS. Нативний крохмаль має найменший, але все ж суттєвий ефект.

Переважно спостерігається, що 2 % модифіковані крохмалі значно ефективніші за 1 %. Однак збільшення концентрації має враховувати

економічну складову (вартість добавки) та можливе зростання енерговитрат на сушіння (вищий сухий залишок).

3.3. Вплив модифікованого кукурудзяного крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку

Руйнівне зусилля картонного кільця під час стискання у поперечному напрямку (Ring Crush Test, RCT) є також одним із важливих показників механічної міцності картону-лайнера. Показник безпосередньо відображає здатність картону протистояти навантаженню стиснення вздовж площини листа, що має критичне значення під час виробництва гофротари та оцінюванні її несучої здатності [22]. У промисловій практиці RCT є одним з основних параметрів, що входять до загальної формули для визначення стійкості до стискання коробки (BCT – Box Compression Test). Тому дослідження впливу модифікованих крохмалів на цей показник дозволяє об'єктивно оцінити підвищення експлуатаційних властивостей лайнерів.

Катіонний крохмаль взаємодіє з аніонними групами целюлози та підвищує ефективність міжволоконної адгезії. Окиснений та ацетильований крохмалі демонструють покращене проникнення в мікрокапілярні пори волокон, а також забезпечують більш однорідне покриття поверхні.

Результати досліджень наведено в додатку В, а середні значення в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Середні значення руйнівного зусилля під час стискання кільця картону-лайнера при використанні різних видів та концентрації крохмалю

Вид крохмалю	Середнє руйнівне зусилля, Н	Приріст, Н	Приріст, %
Нативний (NS) 1%	241,3	-	-
Нативний (NS) 2%	253	-	-
Катіонний (CS) 1%	248,5	7,2	3%
Катіонний (CS) 2%	262,8	9,8	4%
Окиснений (OS) 1%	244,5	3,2	1%
Окиснений (OS) 2%	258,9	5,9	2%
Ацетильований (AS) 1%	242,5	1,2	0%
Ацетильований (AS) 2%	258,9	5,9	2%

Найвище руйнівне зусилля зафіксовано при використанні катіонного крохмалю, що підтверджує його ефективність у зміцненні волоконної структури лайнера.

Залежність руйнівного зусилля під час стискання кільця картону-лайнера від виду і концентрації модифікованого крохмалю наведено на рис. 3.5 – 3.6.

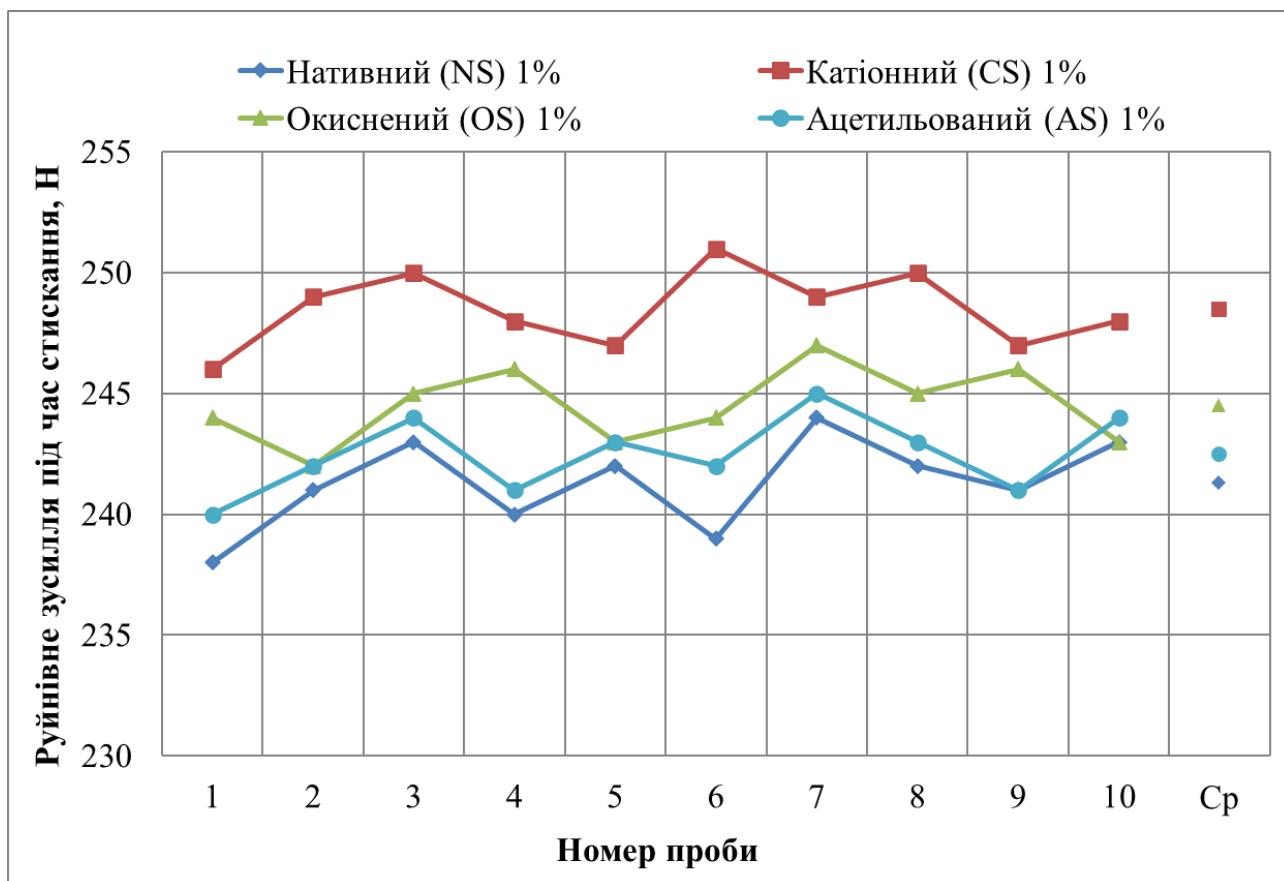


Рис. 3.5 – Вплив 1 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця картону-лайнера

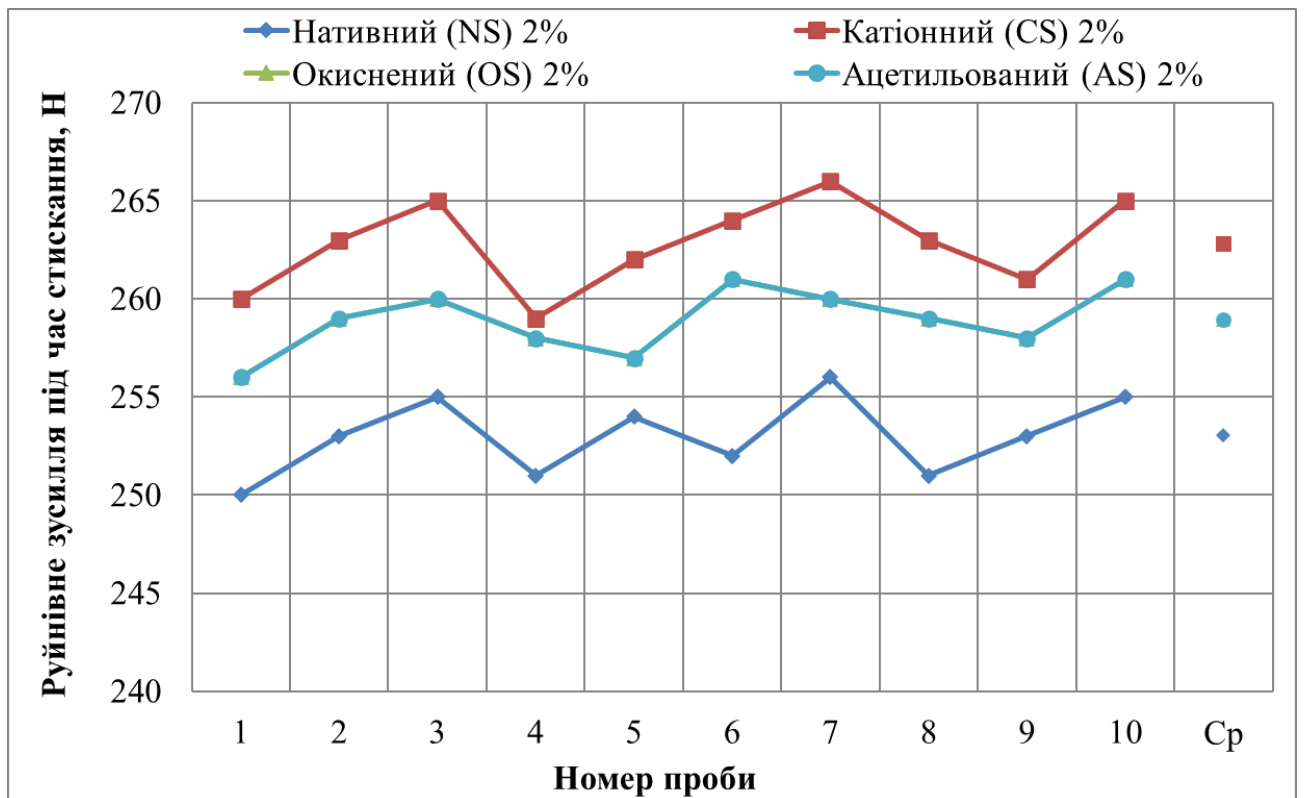


Рис. 3.6 – Вплив 2 % концентрації різних видів модифікованого крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця картону-лайнера

Отримані результати демонструють чітку кореляцію між ступенем модифікування крохмалю та механічними властивостями картону. Додавання крохмалю у всіх випадках підвищує міцність руйнівного зусилля під час стискання кільця картону-лайнера. Збільшення концентрації від 1 до 2% веде до додаткового зміцнення на 4–7% залежно від виду крохмалю.

Найвищий ефект зміцнення демонструє катіонний крохмаль. Найбільше зміцнення завдяки електростатичній взаємодії між позитивно зарядженими групами крохмалю та волокнами (приріст до +4%). Окиснений крохмаль - висока адгезія та здатність проникати між волокнами (приріст до +2%). Ацетильований крохмаль покращує формування поверхні, але має менший вплив на механічні зв'язки (приріст до +2%).

Таким чином, у промислових умовах доцільно застосовувати модифіковані крохмалі, особливо катіонні, коли потрібне максимальне підвищення руйнівного зусилля під час стискання кільця картону-лайнера.

3.4. ВИСНОВКИ

На основі проведених експериментальних досліджень впливу модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні властивості картону-лайнера можна сформулювати такі узагальнюючі висновки:

1. Додавання модифікованого кукурудзяного крохмалю у поверхневу обробку картону сприяє зростанню маси 1 м² виробу, що пов'язано зі збільшенням сухого залишку та формуванням більш щільної поверхневої плівки. Зростання маси до 7% підтверджено лабораторними вимірюваннями та узгоджується із даними інших дослідників, які вказують на аналогічний ефект при використанні крохмальних композицій у поверхневому проклеюванні паперу.

2. Використання модифікованого кукурудзяного крохмалю веде до зростання абсолютного опору продавлюванню (Burst Strength) до 12 %, що підтверджує покращення міжволоконних зв'язків. Подібні показники зміцнення структури целюлозної матриці описані у дослідженнях щодо застосування аніонних та катіонних крохмалів.

3. Встановлено, що руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку (SCT-CD) збільшується внаслідок підвищення жорсткості поверхневих шарів та покращення стабільності волоконного каркасу. Отримане зростання показника (4 %) корелює з відомими закономірностями впливу крохмальних модифікацій на структурно-механічні властивості тарного картону³.

4. Загальні результати свідчать, що оптимальна концентрація модифікованого кукурудзяного крохмалю у поверхневому клеї становить 2 %, оскільки подальше збільшення концентрації не призводить до еквівалентного зростання міцнісних показників, а також може спричинити підвищення нерівномірності нанесення покриття та збільшення витрати енергії на сушіння. Порівняльний аналіз із нормативними вимогами EN ISO та TAPPI показує, що картон, оброблений модифікованим кукурудзяним крохмалем, досягає або перевищує мінімальні стандартизовані значення для пакувального лайнера середнього класу міцності.

Отже, результати дослідження підтверджують доцільність використання модифікованого кукурудзяного крохмалю для підвищення якісних параметрів картону-лайнера, що дозволяє рекомендувати його застосування на целюлозно-паперових підприємствах для оптимізації показників міцності, стабільності та ресурсної ефективності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Smith, T. Global Packaging Outlook 2023. Packaging Research Institute, 2023. URL: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/flexible-packaging-market-size/global>.
2. CEPI. Key Statistics: European Pulp & Paper Industry 2022. Confederation of European Paper Industries, 2023. URL: <https://www.cepi.org/key-statistics-2022/>.
3. Grand View Research. *China Corrugated Board Market Size & Outlook, 2030. Market Analysis Report.* Доступно: URL <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/corrugated-board-market/china>
4. Andersson, K. Advances in Linerboard Production Technologies. PaperTech Review, 2020. URL: <https://www.njreborn.com/uk/news/global-paper-industry-production-and-consumption-overview/>.
5. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>
6. Асоціація “УкрПапір”. URL: <https://gofromagazine.com/pidsumki-roboti-paperovoi-galuzi-ukraini-za-10-misyacziv.html>.
7. Бехта П.А., Тимик Д.В. Закономірності впливу хімічного оброблення поверхні луценого шпону на властивості шпону та фанери. Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць. Львів: РВВ НЛТУ України, 2014 (12). 251–258 с. URL: <https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/166/126>.
8. ДСТУ 3500:2019 Макулатура паперова й картонна. Технічні умови.
9. Corn Refiners Association. (2006). *Corn Starches* (overview, application in papermaking). URL: <https://www.feedipedia.org/node/13767>.
10. Hasanpour, G., Khosravani, A., Tajvidi, M. and Rezayati Charani, P. (2024). Lignocellulosic nanofiber and starch coating on recycled linerboard surface, *BioResources*, 19(4), 8188–8201. DOI: [10.15376/biores.19.4.8188-8201](https://doi.org/10.15376/biores.19.4.8188-8201).
11. Li, H. et al. (2019). Starch and its derivatives for paper coatings: A review. 135, 213-227. DOI: [10.1016/j.porgcoat.2019.05.015](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.015)

12. TAPPI Journal. (2010). Starch-modified fillers for linerboard and paper grades: A perspective review. TAPPI Journal, 9(4):31-36. URL: https://www.researchgate.net/publication/287691485_Starch-modified_fillers_for_linerboard_and_paper_grades_A_perspective_review.
13. ДСТУ 2297 “Напівфабрикати волокнисті, папір та картон. Метод визначення маси продукції площею 1 м²”.
14. Hubbe, M. (2019). Cationic Starch Interactions in Papermaking. Journal of Pulp & Paper Science, 45(2), 67–79. URL <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.591826137919535>
15. Compart, J. et al. (2023). A Review of Starch Modifications and Their Applications. MDPI / PubMed Central URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10459083/?utm_source=chatgpt.com
16. Мовчанюк О.М., Остапенко А.А. Технологія приготування паперової маси. Київ КІП ім. Ігоря Сікорського, 2022.
17. Öznur ÖZDEN, Sinan SÖNMEZ STARCH USAGE IN PAPER INDUSTRY.
18. Waqas Ahmed, Affifa Tajammala, Iqra Zubair Awan Revamping of Paper Properties with Combination of Cationic Starch and Guar Gum in Modern Paper Making June 2024 Journal of Chemistry and Material Sciences URL: https://www.researchgate.net/publication/391844491_Revamping_of_Paper_Properties_with_Combination_of_Cationic_Starch_and_Guar_Gum_in_Modern_Paper_Making.
19. Smook G. Handbook for Pulp & Paper Technologists. 4th ed., 2016. URL: <https://www.scribd.com/document/631751060/Handbook-For-Pulp-and-Paper-Technologists>.
20. ГОСТ 13525.1–68. Картон. Метод определения сопротивления продавливанию.
21. ДСТУ 4380:2005 Крохмаль модифікований. Загальні технічні умови TAPPI T822. Ring Crush of Paperboard. TAPPI Press, 2019. URL: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/T/0104T822.aspx>.
22. TAPPI T822. Ring Crush of Paperboard. TAPPI Press, 2019. URL: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/T/0104T822.aspx>.

23. Жудро С.Г. Основи проектування целюлозно – паперового підприємства. Лісова промисловість, 1965, 303 с.
24. Holik H. (2006). Handbook of Paper and Board. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 524 p. URL: https://www.academia.edu/63491553/Holik_Herbert_Handbook_of_Paper_and_Board.
25. Плосконос В. Г., Букіна Я.І. Наукові аспекти пошуку оптимальних умов використання модифікованих кукурудзяних крохмальних клеїв у виробництві паперу та картону. Міжнародний науково метричний журнал “Інтернаука”. 2019. - №13 (75), 42 -51. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=OgCrPJYAAAAJ&citation_for_view=OgCrPJYAAAAJ:bEWYMUwI8FkC.
26. Ловачева Г.М., Ковтуненко ЛЯ. Спосіб отримання фосфатного кукурудзяного крохмалю та застосування його для харчових цілей. Цукрова пром-сть, 1966.
27. Фляте Д.М. Технологія паперу. Навч. посібник, 1988, 440 с.І
28. Шитов Ф.А. Технологія паперу та картону. Вища школа, 1978, 376 с.
29. Примаков С.П., Барабаш В.А., Технологія паперу і картону: навчальний посібник для вузів. Київ: Екмо, 2002. 396 с.
30. Легоцький С.С., Гончаров В.М. Розмелююче обладнання та підготовка паперової маси. ЛісоваПром-сть, 1990. 224с.
31. Шкваркіна Г.І., Котенкова І.В., Жушман А.І., Бикова С.Т. Модифіковані крохмалі – покращувачі якості хліба. Хлібопекарська та кондитерська пром-сть, 1975, 6, 15-18.
32. Бережна М.І, Свиридова А.І. та ін. Утримання крохмалю паперовою масою у виробничих умовах. Паперова пром-сть, 1982, 3, С. 17.
33. Луцевич Д.Д., Березан О.В. Конспект-довідник з хімії. К.: Вища школа, 1997, 240 с.
34. Жушман А. І. Ж 83 Модифіковані крохмалі, 2007. 236 с.
35. Манзій С.О., Копанський М.М., Козак Р.О., Шепелюк О.О. Технологія переробки макулатури: навч. посіб. Львів: Основа, 2009. 96 с.

36. Галиш В.В., Радовенчик В.М., Радовенчик Я.В, Гомеля М.Д. Утилізація та рекуперація відходів: переробка відходів целюлозно-паперових виробництв: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія”. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 75 с.

37. Grön, J. (1998). Influence of starch modification on the chemical composition and structure of coated layers. Nordic Pulp & Paper Research Journal URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.3183/npprj-1998-13-02-p119-123/html?srsId=AfmBOor85G6wYwmYIefVhjRPEAhtQkQ4DI16xwgyIgktgHTtdbt1Rj67&utm_source=chatgpt.com

38. Pay, H.T. Effect of the starch source on the performance of cationic starches URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effect-of-the-starch-source-on-the-performance-of-cationic-starches-having-similar-degree-of-substitution-for-papermaking-using-deinked-pulp/>

39. ДСТУ 3500-97 (ГОСТ 10700-97) Макулатура паперова та картонна. Марки та види макулатури.

40. ДСТУ 3500:2009. Макулатура паперова й картонна. Технічні умови.

41. ДСТУ 2098-92. Виробництво паперу та картону. Терміни та визначення.

42. ДСТУ EN ISO 186:2008. Папір і картон. Метод відбирання проб для визначення середньої якості.