

УДК 676.274

ЧЕРЬОПКИНА Р. І., ДЕНИСЕНКО А. М.*, ЯЦЕНКО С. Ю., КУШМІТЬКО О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ЦИКЛІЧНОСТІ ПЕРЕРОБЛЕННЯ НАПІВФАБРИКАТІВ ІЗ ДЕРЕВИНИ ПАВЛОВНІЇ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ

Папір для гофрування є складовою частиною гофрованого картону, що відіграє важливу роль у формуванні показників міцності і його виробництво в останнє десятиліття входить до найбільш розвинених секторів світової целюлозно-паперової промисловості.

У статті науково-обґрунтовано відмінності між первинними та повторно переробленими волокнами, а також дано пояснення суті «незворотного ороговіння» волокна.

У роботі досліджено використання листяних напівфабрикатів, отриманих із деревини павловнії лужно-сульфатним та натронним способами для виготовлення паперу для гофрування з вивченням потенціалу повторного його перероблення. Отримано закономірності зниження показників міцності паперу зі збільшенням циклів перероблення, що пояснюється незворотнім ороговінням. Показано, що використання волокнистих напівфабрикатів, отриманих лужно-сульфатним способом у папері забезпечує значення міцності за всіма показниками для марок Б-2 та Б-3 після чотирикратного перероблення даних волокон. Слід наголосити, що за показником абсолютного опору продавлюванню паперу отримані значення забезпечують норми найвищої марки Б-0 після трикратного циклу перероблення.

Отриманими даними щодо повторного перероблення паперу із натронних ВНФ показано, що найбільше зниження показників механічної міцності спостерігається після першого циклу перероблення, особливо абсолютного опору продавлюванню. Однак після другого циклу перероблення за даним показником зберігається запас міцності, якого вистачає для норм марки Б-2 та Б-3. Після п'ятикратного перероблення такого паперу показники міцності зберігаються майже на 50 % від початкових, на противагу для лужно-сульфатних – після чотирикратного перероблення потенціал складає приблизно одну третю.

Мікрофотографіями поверхні паперу та зміною структури волокон від кількості циклів перероблення підтверджено отримані у ході дослідження закономірності.

Ключові слова: волокнисті напівфабрикати, павловнія, папір для гофрування, ороговіння, цикли перероблення, показники міцності

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307364

*Corresponding author: anna.denysenko.7796@gmail.com

Received 30 May 2024; Accepted 19 June 2024

Постановка проблеми. Целюлозно-паперова галузь світу з 2020 року зазнала суттєвих трансформацій, які, в основному, пов'язані з пандемією COVID-19. Це в першу чергу торкнулося перерозподілу на користь виробництва пакувальних видів паперу і картону. У період з 2020 по 2021 рік лише за один рік приріст виробництва пакувальних видів паперу і картону виріс на 6 %, на противагу папір для друку та для письма – лише на 0,6 % [1].

Споживання паперової упаковки за останні 3–4 роки стимулювалося підвищенням попиту на електронну комерцію, а також зростанням занепокоєння з приводу забруднення пластиковою упаковкою [2].

У результаті паперова упаковка становить найбільше джерело відходів у Європі, що за вмістом перевищує пластик і скло разом взяті.

У 2020 році у світі було перероблено 59,7 % від загальної кількості спожитого паперу, більше всього в Європі 73,3 % та Північній Америці 68 %. Показано, що з усіх видів упаковки в Європі найбільше переробляється макулатура до 82 %, за нею йдуть метали – до 77,4 %, скло – 75,4 % і пластмаси – 40,6 % [3].

Такий підхід частково продиктований дефіцитом природних ресурсів та впливом на довкілля всієї людської діяльності.

Основною сировиною для виробництва паперу є целюлоза, яку отримують з хвойних або листяних порід деревини. Оскільки нині зберігається високий попит на екологічну паперову упаковку в усіх областях промисловості, то і потреби у сировині для її виробництва також збільшуються [4].

За статистичними даними щороку для виробництва паперової упаковки у всьому світі в середньому вирубують 3 мільярди дерев і ця цифра, за прогнозами, зростатиме [2]. Для їх відновлення потрібен тривалий час і значні матеріальні ресурси. Тому як альтернативу частіше використовують перероблений папір, що, за багатьма дослідженнями, дозволяє економити в середньому 78 % води, 68 % енергії та 15 % викидів CO₂ у порівнянні з папером, який виготовлено з первинної целюлози [4].

Однак багаторазове повторне перероблення вторинних волокон за рахунок розмелювання, пресування, укорочування, сушіння, оброблення призводить до зміни механічних і хімічних властивостей волокон. Глибина цих змін буде залежати від кількості циклів та способу використання волокон. Тому дослідження щодо перероблення вторинних волокон стають все більш важливими для стійкого розвитку картонно-паперового виробництва як екологічно безпечного.

Аналіз попередніх досліджень. Вторинні волокна відрізняються від первинних втратою паперотворного потенціалу за рахунок їх багаторазового повторного перероблення. Однією з основних причин зниження якості таких волокон вважають проблему циклічності їх перероблення. Збільшення числа циклів використання вторинного волокна пов'язане, з одного боку, з дефіцитом макулатури, а з іншого – сучасними підходами до підготовки макулатурної маси, що дозволяють оптимально виявляти потенціал паперотворних властивостей вторинного волокна навіть за низькоякісного вихідного матеріалу.

На якість целюлозних волокон значний вплив мають технологічні процеси підготовки маси, розпуск і розмелювання, а також сушіння та оброблення, зберігання, що позначається на різних змінах у морфології волокон, які є причиною зниження паперотворних властивостей вторинного волокна.

Встановленням причин морфологічних та хімічних змін вторинних волокон, а також оцінювання їх властивостей та прогнозування міцності паперу, виготовлених з них займалися багато дослідників [5,6]. Професором Джайме ще у минулому столітті було запропоновано оцінювати властивості різних волокон за показником водоутримуючої здатності [7]. У результаті досліджень показано, що величина утримання волоконом води залежить від «незворотного ороговіння», яке зв'язане із незворотними змінами в структурі клітин під час сушіння целюлози [7].

Подальшими дослідженнями в лабораторних умовах показано, що після повторного перероблення зразків вибіленої сульфатної целюлози показники міцності були достатньо низькими [8, 9]. Таку поведінку пояснювали ороговінням волокон, тобто після повторного змочування їх водою, вони ставали більш жорсткішими, менш еластичними у порівнянні до початкового стану. Показано, що повторно перероблені волокна менше набухали, оскільки зменшувалася кількість води, яка утримувалася волокнами всередині їх клітинних стінок [7,10–12].

Багатьма роботами доведено, що для відновлення потенціалу вторинного волокна необхідною умовою є підвищення показника внутрішнього набухання волокон [7,12,13]. Оскільки целюлозне волокно характеризується складною фібрилярною (капілярно-пористою) структурою, яка пронизана порами і капілярами різної величини, то просочення водою призводить до збільшення внутрішньої поверхні целюлозного волокна. Набухання волокон пришвидшує процес фібрилювання під час розмелювання. Процес розмелювання проводять з метою підготовки поверхні целюлозного волокна до утворення міжволоконних зв'язків за рахунок колоїдно-хімічних явищ, які починаються з набухання гідрофільних волокон, що у свою чергу призводить до відщеплення найтонших фібрил.

Під час змочування целюлози водою контакт між волокнами утворюється через гідроксильні групи на поверхні волокон. Далі вода проникає у міжміцелярний простір, аморфну область, і зв'язується з гідроксильними групами на поверхні міцел, що і є причиною набухання волокон. Вода не проникає всередину міцел, тобто впорядкованих, кристалічних, структур.

Набухання сприяє розриву первинної оболонки волокон, оголенню внутрішніх поверхонь, а відповідно збільшенню питомої площі розвернутої поверхні волокон за рахунок чого збільшується кількість взаємних контактів целюлозних ланцюгів. Набухання, або внутрішнє фібрилювання, підвищує гнучкість, пластичність волокон, що інтенсифікує процес розмелювання без суттєвого укорочування волокон.

Без сумніву, процес розмелювання проводять з метою покращення схоплення між волокнами за рахунок відновлення здатності внутрішнього набухання.

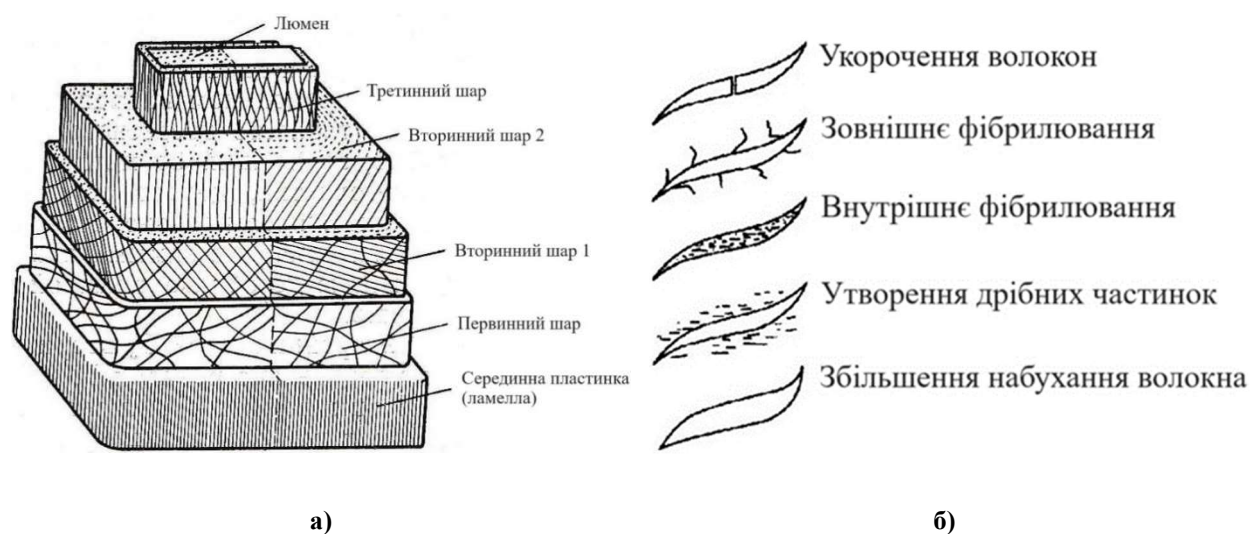
Доведено на практиці, що у ході розмелювання одночасно відбуваються зміни всередині та ззовні волокна, укорочення та утворення дріб'язку, які можна описати наступним чином (рис. 1) [12,13]:

а) укорочення волокон у будь-якому місці під будь-яким кутом упоперек волокна, найчастіше у слабких місцях;

б) звільнення та розпад клітинної стінки, що пов'язано із сильним набуханням, що виражається у вигляді внутрішньої фібриляції та розшарування. Розшарування являє собою коаксіальне розщеплення у середньому шарі вторинної стінки, що викликає підвищене проникнення води до клітинної стінки та пластифікацію волокна;

в) зовнішнє фібрилювання та відшарування фібрил від поверхні, що частково або повністю зачіпають первинну стінку та зовнішні шари вторинних стінок. Одночасно із зовнішніми шарами відбувається розщеплення фібрил, мікрофібрил, нанофібрил до макромолекули целюлози та геміцелюлози;

г) одночасно з основними процесами під час розмелювання мають місце і побічні процеси, наприклад, утворення коротких частинок, стиснення вздовж осі волокон, хвилястість волокон за рахунок стиснення [14].



а – структура волокна, запропонована Kerr і Varley; б – зміни структури волокна

Рис. 1 – Можлива дія на волокна в процесі приготування маси

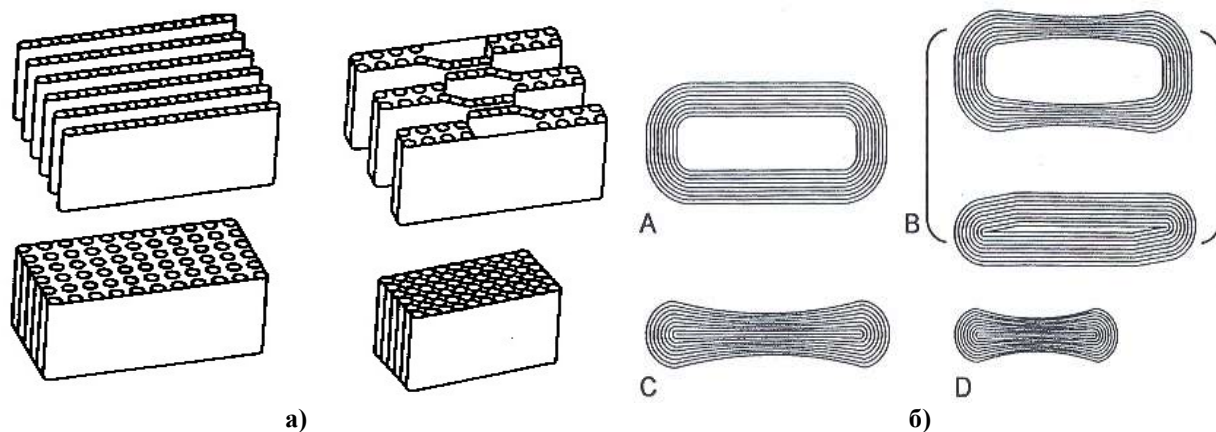
Вважається, що процес сушіння найбільше впливає на зміну властивостей волокон, яке виражається у втраті еластичності, ороговінні поверхні та підвищенні їх крихкості. Такі зміни властивостей пояснюються тим, що під час сушіння люмен, внутрішній канал, і пори стискаються і трубчаста форма волокна переходить у стрічкову (рис. 1). У подальшому із стінок волокон десорбується вода, що призводить до втрати здатності до набухання через нездатність багатьох пор знову відкритися під час повторного змочування волокон [15].

Згідно більшості уявлень, ороговіння відбувається у клітинній стінці волокна. Під час сушіння відшаровані частини стінки волокна, тобто мікрофібрили целюлози стають зв'язані [15–17]. Між цими пластинками (фібрилами) утворюються водневі зв'язки. Також відбувається переорієнтація та краще вирівнювання мікрофібрил. Усе це зумовлює утворення зімкнутої структури. Під час подальшого повторного змочування у воді мікроструктура клітинної стінки волокна залишається більш стійкою до розволокнення, оскільки деякі водневі зв'язки не відкриваються повторно. Все волокно стає жорсткішим і крихким. Вважається, що ороговіння не збільшує кристалічність целюлози або ступінь упорядкованості геміцелюлозу у стінці волокна [18].

Ороговіння безпосередньо не відбувається за усадкою, оскільки найбільша усадка волокон відбувається за вмісту твердих речовин більше 80 %.

На рис. 2, стадія А являє собою крафт-волокно перед сушінням. На стадії В, за рахунок видалення вологи, починаються морфологічні зміни в матриці волокнистої стінки за вмісту твердої фази до 30 %. Фібрили волокнистої стінки починають зближуватися за рахунок дії капілярних сил. На цьому етапі просвіт в поперечнику фібрили може скорочуватися. У ході подальшого висихання проміжки між фібрилами

продовжують скорочуватися до фази С, де вже закрилася більшість вільних порожнин у фібрилярній структурі клітинної стінки. Усадка волокон відбувається виключно під прямим кутом до шарів фібрил, тому стінки волокна стають більш тоншими. До кінця сушіння на стадії D відбувається видалення води в тонкій структурі волокнистої стінки, тобто в її аморфній області. Крафт-волокно дає сильну і рівномірну усадку на цьому заключному етапі сушіння, тобто за вмісту твердих речовин більше 75 – 80 %. Усадка на стадії D незворотна.



а – зміни у структурі волокнистої стінки [16]; б – усадка поперечного перерізу волокна [17]

Рис. 2 – Зміна структури волокна під час сушіння

Під час повторного використання висушених волокон у паперовому виробництві клітинні стінки знову одержують воду і відновлюють свою форму. Далі відбуваються процеси, протилежні до тих, що показано на рис. 2. Ороговіння починається поступово на стадіях В та С і досягти розмірів первинного волокна у ході повторного зволоження не вдається. Простір між мікрофібрилами у шаруватій структурі клітинної стінки стає не повністю відкритим і деякі мікрофібрили залишаються частково недоступні для води.

На основі багатьох досліджень властивостей вторинних волокон було визначено, що під час перероблення вони містять неоднорідну суміш волокон із зміненими характеристиками [17,18].

До основних характеристик вторинного волокна можна віднести:

- суттєві зміни як фізичних, так і хімічних властивостей порівняно з первинними;
- зниження міцності індивідуальних волокон: дрібні частинки волокон із пошкодженою поверхнею мають слабку здатність до утворення міжмолекулярних зв'язків, а під час формування листа зменшується механічне зчеплення волокон;
- погіршення здатності волокон до набухання, гідратації та внутрішнього фібрилювання;
- підвищену здатність до подрібнення в процесі розпускання та розмелювання і, як наслідок, значно неоднорідність погіршення фракційного складу;
- значну втрату здатності до утворення міжволоконних хімічних водневих зв'язків.

Із літературних джерел бачимо, що більшість досліджень вторинного перероблення волокон проводили з хвойних порід [18]. Треба відмітити, що за хімічним складом та морфологічною будовою волокна листяних порід суттєво відрізняються від хвойних. Так основними у листяних порід є волокна лібриформу, які становлять приблизно 50 % деревини та їх довжина досягає 0,2–2,2 мм, судини становлять 20 %, паренхимні клітини біля третини. Розміри судин суттєво залежать від породи деревини, їх положення у річному кільці, росту та кліматичних умов і знаходяться у широкому діапазоні довжини від 0,2–0,8 мм та ширини до 0,4 мм [18,19].

Однак вивченню фізико-хімічних і механічних властивостей листяних волокон під час багаторазових циклів перероблення приділено ще не достатньо уваги.

Метою роботи було вивчення впливу циклічності перероблення на показники міцності напівфабрикатів, отриманих лужно-сульфітним та натронним способами із деревини *Paulownia Clone in Vitro 112®* використаних для виготовлення паперу для гофрування.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити наступні завдання:

- отримати волокнисті напівфабрикати (ВНФ) із деревини павловнії лужно-сульфідним та натронним способами;
- виготовити лабораторні зразки паперу для гофрування із отриманих напівфабрикатів;
- дослідити зміну показників міцності паперу для гофрування після повторних циклів його перероблення;
- показати здатність волокон, отриманих лужно-сульфідним та натронним способами до набухання після повторного перероблення.

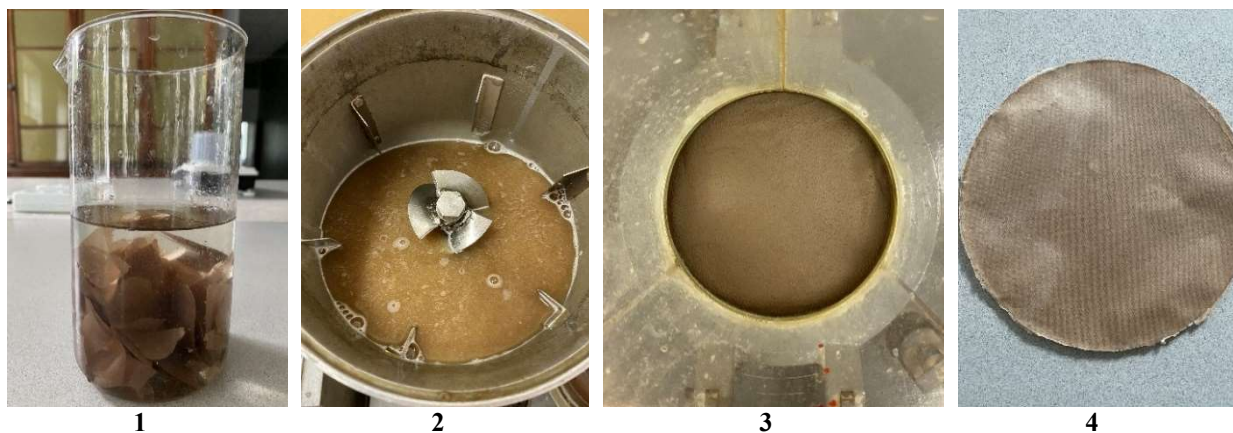
Методика роботи. Дослідження з переробки макулатури проводили з використанням паперу для гофрування, отриманого в лабораторних умовах із ВНФ після варіння деревини павловнії лужно-сульфідним та натронним способами. У ВНФ визначали вихід за стандартною методикою TAPPI T 222 om-21 [20] та вміст лігніну за стандартом TAPPI/ANSIT 412 om-22 [21].

Для виготовлення паперу для гофрування у лабораторних умовах лужно-сульфідні та натронні ВНФ розмелювали у відцентрово розмелювальному апараті (ВРА) до 45 °ШР та із розмеленої маси виготовляли зразки паперу на листовідливому апараті (ЛІА-1) масою 80 ± 4 г/м². У отриманому папері визначали наступні фізико-механічні показники: опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу (СМТ₃₀) за ширини смужки 15 мм, Н (ДСТУ EN ISO 7263:2017) [22]; абсолютний опір продавлюванню, кПа (ДСТУ ISO 2759:2007) [23]; міцність під час розтягування в машинному напрямку, кН/м (ДСТУ 2334-93) [24]; опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу (ССТ₀), кН/м (TAPPI T 824 cm-23) [25]; опір стисненню зразка на короткій відстані в поперечному напрямку (SCT), кН/м (ISO 9895:2008) [26].

З метою вивчення паперотворних властивостей волокон павловнії після їх повторного використання, за початкову точку обрано папір для гофрування – цикл № 0, отриманий із ВНФ розмелених до 45 °ШР у ВРА. Для циклу № 1 та наступних № 2–4 зразки паперу від попередніх циклів подрібнювали на шматочки та замочували протягом 45 хв у водопровідній воді. Після набухання волокнисту масу кількісно переносили у гідророзбивач лабораторно-розмелювального комплексу (ЛРК-1) з метою її подальшого розволокнення на окремі волокна (повного розділення пучків) протягом 10–15 хв до 45 °ШР. Для кожного циклу перероблення проводили контроль ступеня млива маси на приладі СР-2 типу Шоппера-Ріглера. З розволокненої маси виготовляли відливки паперу на листовідливому апараті (ЛІА-1) масою 80 ± 4 г/м². Після кожного циклу залишали по 2 зразки відливоків для визначення фізико-механічних показників, а інші піддавали повторному переробленню.

Отримані значення показників міцності досліджуваних зразків паперу порівнювали зі стандартом ДСТУ 7798:2021 [27].

Схематичний процес перероблення зразків паперу для гофрування наведено на рис. 3.



1 – набухання; 2 – розволокнення в гідророзбивачі; 3 – виготовлення відливки; 4 – зразок готового відливка

Рис. 3 – Схематичний процес перероблення зразків паперу для гофрування

Наступним етапом у роботі було мікроскопічне дослідження отриманих лабораторних зразків паперу для гофрування на мікроскопах iScore, IS.1053-PLMi, trino (Нідерланди) та Bresser Biolux LCD 50x-2000x (Німеччина).

Завершальним етапом роботи було дослідження здатності волокна до набухання в залежності від способу їх отримання.

Для дослідження здатності волокна до набухання використовували лужно-сульфітні та натронні ВНФ. Наважки досліджуваних ВНФ по 10 г, зважували на технічних вагах з точністю $\pm 0,01$ г, переносили в лабораторні склянки об'ємом 250 мл, заливали дистильованою водою і витримували протягом визначеного часу від 15 до 60 хв з інтервалом 15 хв. Експерименти проводили за кімнатної температури 18 ± 2 °С. Після закінчення певного часу набряклу волокнисту масу відфільтровували на воронці Бюхнера, витримували на сітці для вільного стікання води протягом 2 хв, переносили в бюкси і зважували для визначення ступеня набухання волокон за формулою [28]:

$$H = \frac{m_i - m_0}{m_0} \cdot 100 \%,$$

де m_i – маса ВНФ після певного часу набухання, г; m_0 – маса ВНФ, взята для набухання, г.

Виклад основного матеріалу. Вихідні умови отримання ВНФ для виробництва паперу для гофрування наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Умови отримання волокнистих напівфабрикатів

Умовне позначення	Витрати активного лугу, % від маси абс. сух. сировини	Концентрація всього SO ₂ , г/л	Тривалість варіння за кінцевої температури, хв	Кінцева температура варіння, °С	Наявність каталізатора
параметр № 1	–	35	90	180	0,1 % AQ
параметр № 2	–	40	90	170	–
параметр № 3	–	40	150	170	–
параметр № 4	–	45	90	170	–
параметр № 5	20	–	150	170	–
параметр № 6	20	–	180	170	0,1 % AQ
параметр № 7	20	–	180	170	20 об. % C ₂ H ₅ OH

Для виготовлення зразків паперу для гофрування використовували наступні ВНФ з такими показниками якості:

- параметр № 1: вихід ВНФ, від маси абс. сух. сировини – 62,1% та масова доля лігніну – 7,6 %;
- параметр № 2: 76,9 % та 15,7 %, відповідно [29];
- параметр № 3: 61,2 % та 12,7 %, відповідно [29];
- параметр № 4: 71,1 % та 14,2 %, відповідно [29];
- параметр № 5: 47,5 % та 12,6 %, відповідно;
- параметр № 6: 45,8 % та 8,5 %, відповідно;
- параметр № 7: 54,2 % та 13,5 %, відповідно.

Папір для гофрування, який використовується у вигляді гофрованого шару у гофрокартоні приймає основне навантаження і тому повинен відповідати високим показникам жорсткості (опору площинному та торцевому стисненню гофрованого зразка паперу) та міцності під час розтягування. Жорсткість паперу для гофрування багато в чому визначає жорсткість всього гофрованого картону і саме від характеристики паперу для гофрування залежать амортизаційні властивості гофрованого картону та гофротари.

У роботі досліджено здатність до багаторазового перероблення целюлозних волокон зразків паперу для гофрування отриманих лужно-сульфітним та натронним способами з деревини павловнії, що є важливим етапом для їх повторного використання.

Гістограми залежностей фізико-механічних показників паперу для гофрування, отриманого із лужно-сульфітних ВНФ від кількості циклів перероблення наведено на рис. 4 – 7.

На рис. 4 наведено гістограму залежності показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу від кількості циклів його перероблення, отриманого із лужно-сульфітних ВНФ.

Як видно з графічних залежностей (рис. 4), норма марки Б-3 (60 Н) досягається навіть після 3-го циклу перероблення паперу для гофрування для параметра № 1 та після 2-го циклу – для параметра № 4. Спостерігається зниження показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу від 1 до

12 % з кожним циклом для параметра № 1 та 4. Якщо порівнювати даний показник для параметра № 2 і 3, то необхідно відмітити різке його зниження після 1-го циклу до 43 % для параметра № 2 та після 2-го циклу – до 26 % для параметра № 3, подальше зниження уповільнюється. Загальне зниження показника після всіх циклів перероблення зразка паперу досягає 22 – 66 % і, в основному, залежить від якості ВНФ.

Гістограму залежності показника абсолютного опору продавлюванню від кількості циклів перероблення паперу для гофрування, виготовленого із лужно-сульфітних ВНФ, наведено на рис. 5.

Щодо показника абсолютного опору продавлюванню паперу, то він задовольняє норми марки Б-0 (195 кПа) для 0 – 2 циклів для параметра № 1 та для 0 – 1 циклів – для параметра № 3 і 4 (рис. 5). Вимоги до марки Б-2 (125 кПа) вдається досягти навіть після 3-го циклу перероблення для параметра № 1 та після 2-го циклу – для параметра № 3 і 4. Помітно, що для параметра № 2 не вдається досягти норм марок за ДСТУ 7798:2021 [27], що пов'язано з низьким ступенем делігніфікації ВНФ – 15,7 % [29]. Слід відмітити, що загальне зниження даного показника після всіх циклів перероблення паперу знаходиться в межах 57 – 77 %.

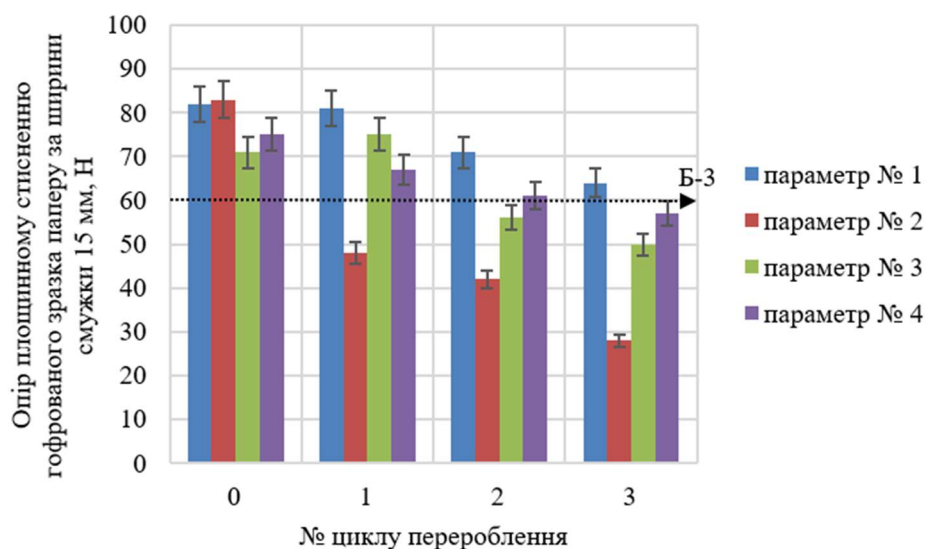


Рис. 4 – Залежність показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу від кількості циклів перероблення

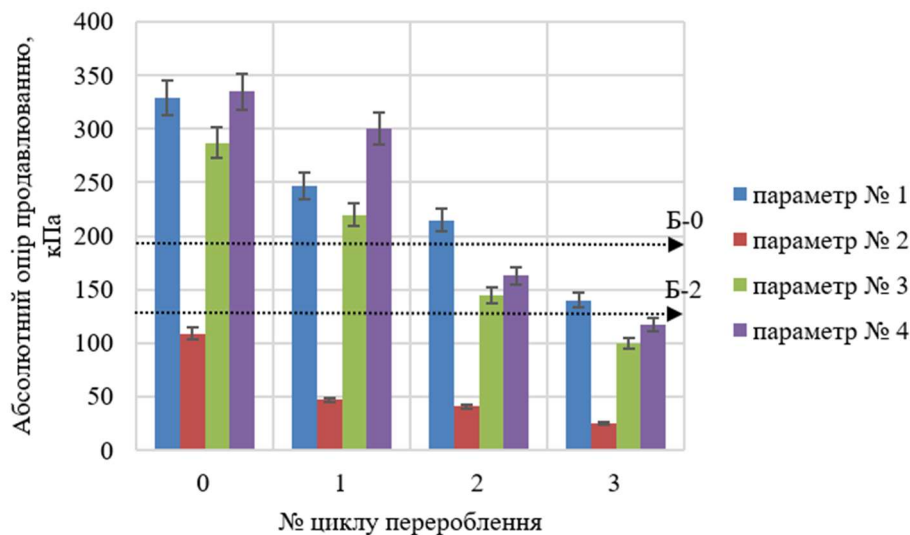


Рис. 5 – Залежність показника абсолютного опору продавлюванню паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

На рис. 6 наведено гістограму залежності показника опору торцевому стисненню гофрованого зразка паперу, отриманого із лужно-сульфатних ВНФ від кількості циклів його перероблення.

Із діаграми (рис. 6) можна зробити висновок, що норми для марки Б-0 (0,80 кН/м) досягнуто для параметрів № 1, 3 і 4 та марки Б-1 (0,50 кН/м) для всіх наведених вище циклів. Отримані результати демонструють зниження показника опору торцевому стисненню гофрованого зразка паперу в межах 9 – 27% з кожним наступним циклом перероблення. Зниження даного показника після 1-го циклу перероблення для параметра № 2 становить біля 45 %. Така ж закономірність спостерігається щодо опору площинному стисненню. Сумарно повторно перероблене волокно втрачає міцність до 40 – 63 %.

Гістограму залежності опору стисненню зразка на короткій відстані від кількості циклів перероблення паперу для гофрування, виготовленого із лужно-сульфатних ВНФ, наведено на рис. 7.

Метод стиснення на короткій відстані відображає дійсне зусилля, необхідне для руйнування структури міжволоконних зв'язків. За результатами досліджень (рис. 7) видно, що після 2-го циклу перероблення лабораторних зразків паперу для гофрування, норми марки Б-0 (1,2 кН/м) досягнуто для параметрів № 1 і 4, марки Б-1 (1,1 кН/м) для параметра № 3 та марки Б-3 (0,9 кН/м) для параметра № 2. Показано, що зниження показника опору стисненню зразка на короткій відстані після кожного циклу коливається в межах 13 – 31 %. Варто зауважити, що вплив циклічності перероблення на волокно призводить до зниження його міцності в загальному до 38 – 47 %.

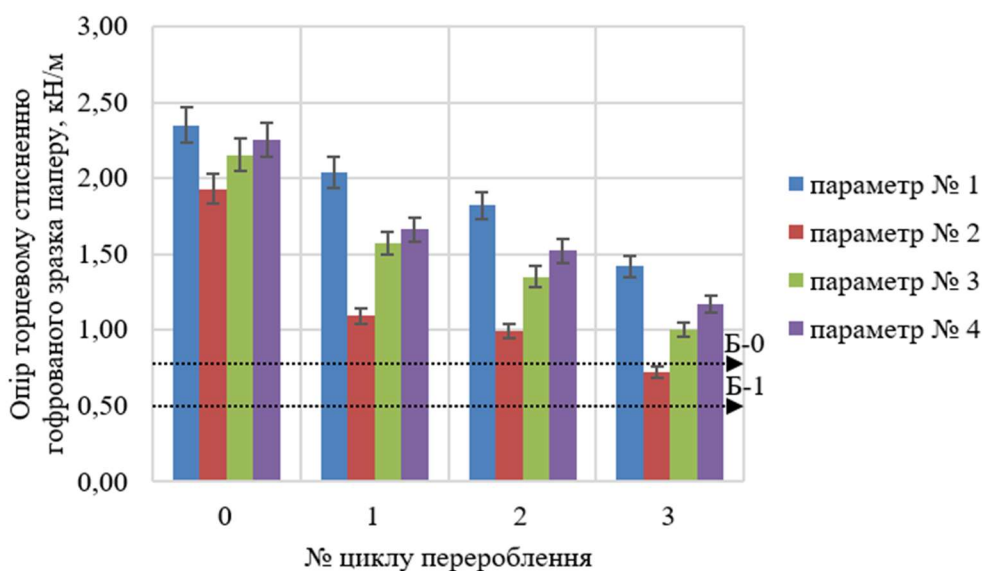


Рис. 6 – Залежність показника опору торцевому стисненню гофрованого зразка паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

Із результатів дослідження можна зробити заключення, що повторне перероблення до 4-х разів (враховуючи 0 цикл) волокон павловнії, отриманих лужно-сульфатним способом призводить до втрати механічних показників приблизно від 22 % до 77 % у залежності від якості вихідних ВНФ. Збереження показників міцності вдається досягти за рахунок краще делігніфікованих волокон, що позначається на підвищенні гнучкості волокон, а, відповідно, і збереження їх довжини. Очевидно чотирикратне перероблення даних волокон, попри втрату показників, все ж забезпечує отримання паперу для гофрування за всіма показниками для марок Б-2 та Б-3. За показниками абсолютного опору продавлюванню паперу отримані показники забезпечують норми найвищої марки Б-0 після трикратного циклу перероблення, крім параметра № 2. За показником опору торцевому стисненню досягнуто показників для всіх марок навіть після чотирикратного перероблення та за показником опору стисненню зразка на короткій відстані досягнуто показників також за чотирикратного перероблення, окрім параметра № 2.

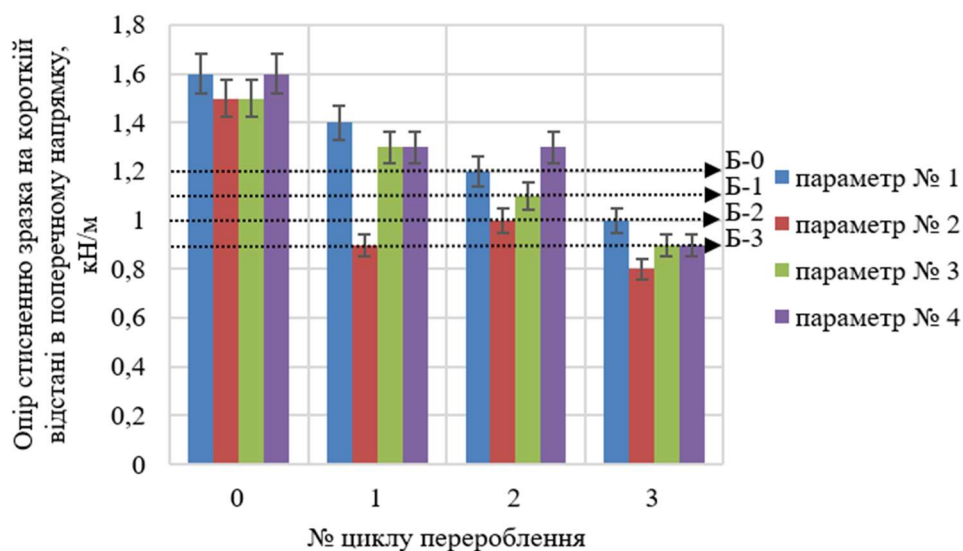


Рис. 7 – Залежність показника опору стисненню зразка на короткій відстані паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

Гістограми залежностей фізико-механічних показників паперу для гофрування, отриманого із натронних ВНФ від циклів перероблення наведено на рис. 8–11.

На рис. 8 наведено гістограму залежності показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу від кількості циклів його перероблення, отриманого із натронних ВНФ.

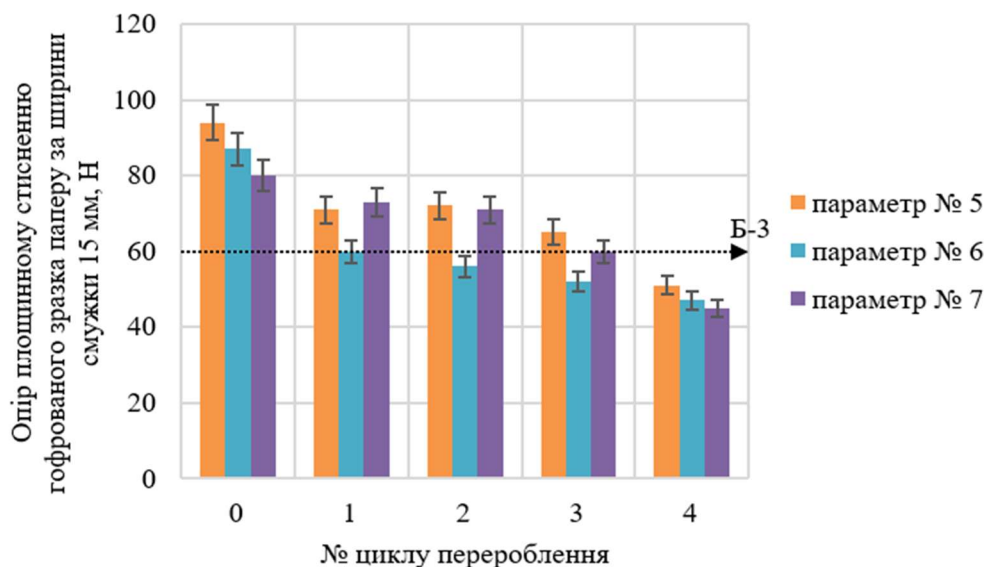


Рис. 8 – Залежність показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

Як видно із залежностей гістограми на рис. 8, відбувається помітне зниження показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу після 1-го циклу в межах 25–32 % для параметрів № 5 і 6. У середньому зниження показника міцності після кожного наступного циклу перероблення складає до

9 %. Щодо загального зниження, то після всіх циклів перероблення гофрований зразок паперу втрачає міцність у межах 45 %. Показник опору площинному стисненню є основним показником для гофрованого паперу і, треба відмітити, що навіть після 3-го циклу вдається досягти норми для марки Б-3 (60 Н) для параметрів № 5 та 7, а для параметра № 6 тільки після 1-го циклу. Таку закономірність частково можна пояснити ступенем делігніфікації волокон та їх ступенем ороговіння.

Гістограму залежності показника абсолютного опору продавлюванню паперу для гофрування, отриманого із натронних ВНФ від кількості циклів перероблення наведено на рис. 9.

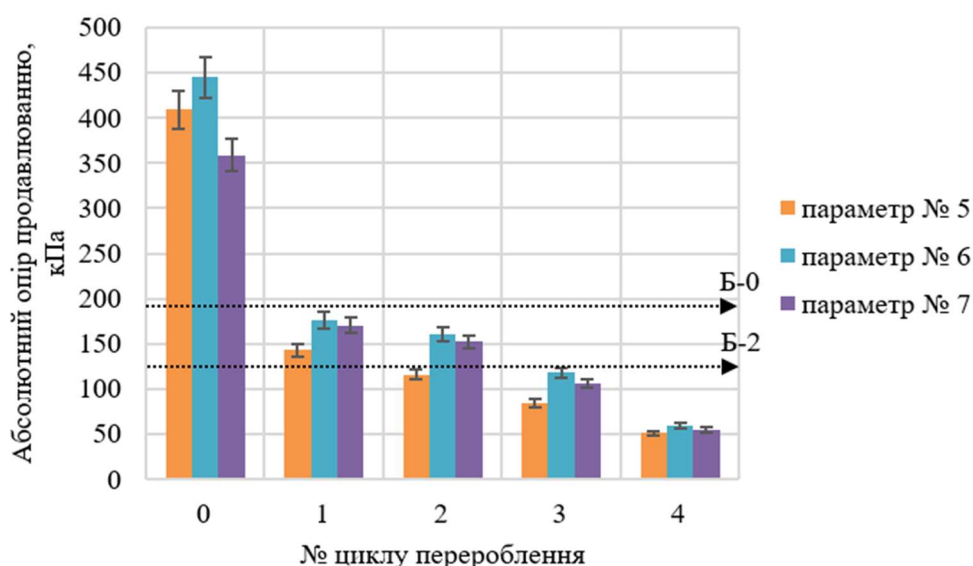


Рис. 9 – Залежність показника абсолютного опору продавлюванню паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

Показник опору продавлюванню відноситься до універсальних показників міцності ВНФ та паперу. У результаті дослідження впливу кількості циклів перероблення паперу вже після 1-го циклу відбувається різке зниження значень даного показника більш ніж на половину (від 54 до 66 %). Однак з кожним наступним циклом спостерігається уповільнення зниження цього показника. Варто зауважити, що після 4-бох циклів перероблення папір втрачає значення міцності майже на 86 %.

З результатів наведених на рис. 9 видно, що норми марки Б-0 (195 кПа) досягнуто для вихідних зразків паперу для гофрування (цикл № 0), а для марок Б-2 (125 кПа) після 2-го циклу перероблення крім значень для параметра № 5.

На рис. 10 наведено гістограму залежності показника міцності під час розтягування в машинному напрямку паперу для гофрування, виготовленого із натронних ВНФ від кількості циклів перероблення.

Як видно з наведених вище даних (рис. 10), вихідний зразок паперу для гофрування задовольняє норми марки Б-0 (5,0 кН/м) для всіх параметрів, однак після 1-го циклу перероблення для параметрів № 5 і 6 – марки Б-1 (4,5 кН/м), після 3-го циклу для параметра № 7 – марки Б-2 (4,0 кН/м) та після 4-го циклу для параметрів № 6 і 7 – марки Б-3 (3,5 кН/м). Спостерігається різке зниження показника міцності під час розтягування в машинному напрямку вже після 1-го циклу перероблення на 22 – 40 %, з подальшим уповільненням значень лише до 6 %. Варто відмітити, що загальне зниження даного показника міцності (після 4-бох циклів перероблення) досягає в середньому 46 %.

Гістограму залежності показника опору стисненню зразка на короткій відстані паперу для гофрування, отриманого із натронних ВНФ від кількості циклів перероблення наведено на рис. 11.

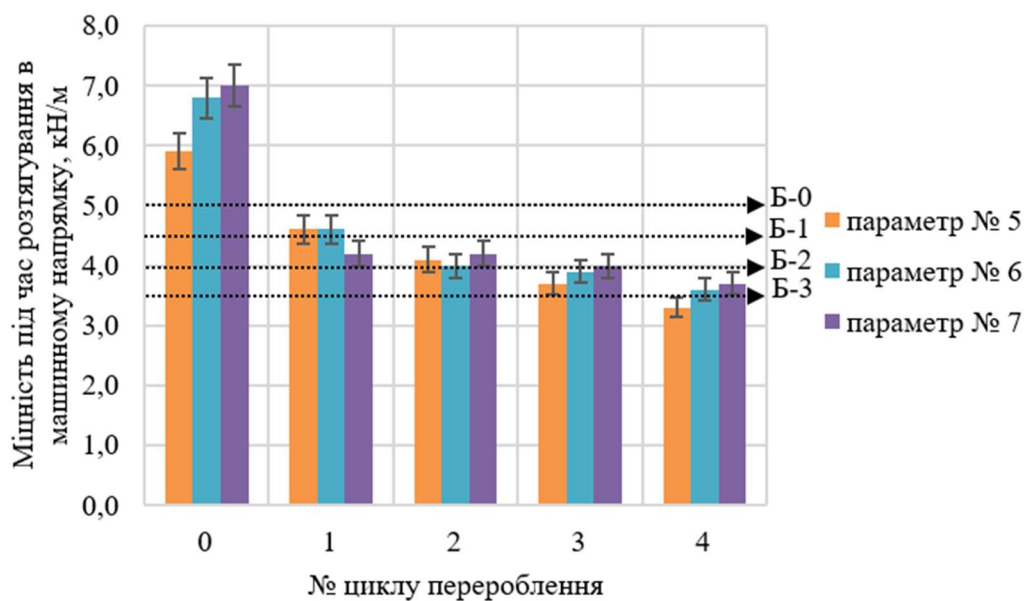


Рис. 10 – Залежність показника міцності під час розтягування в машинному напрямку паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

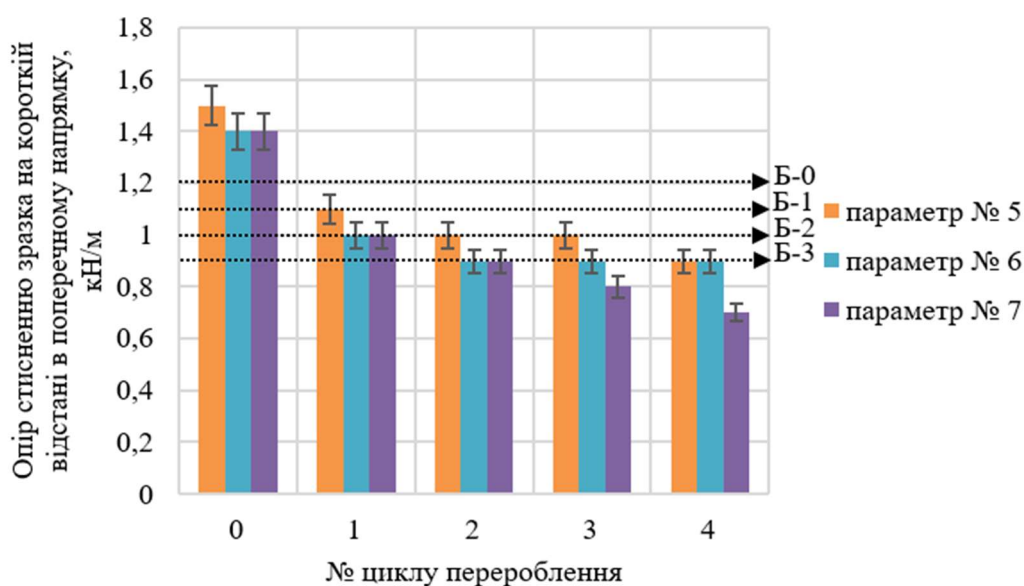


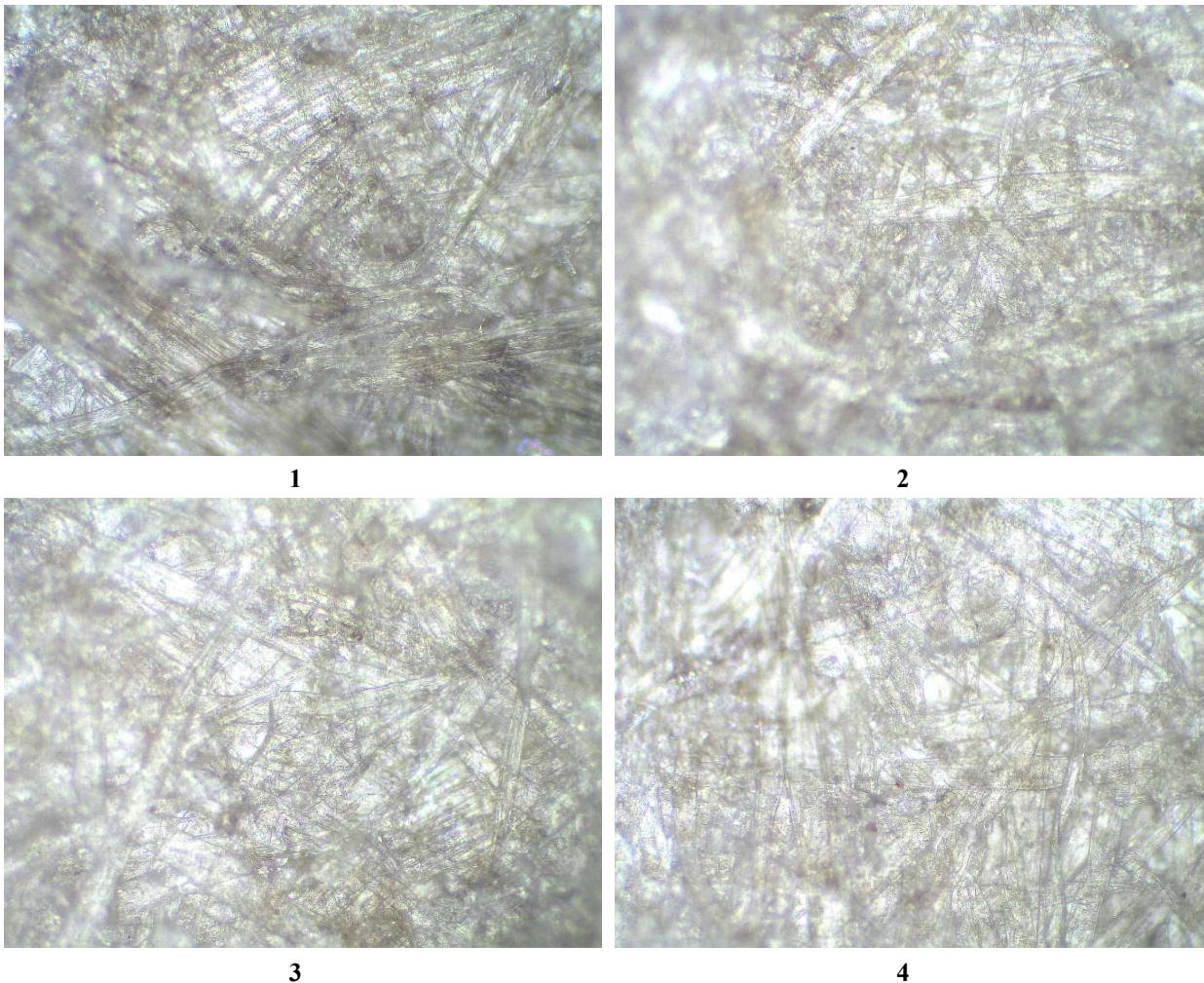
Рис. 11 – Залежність показника опору стисненню зразка на короткій відстані паперу для гофрування від кількості циклів перероблення

Отримані результати на рис. 11 свідчать про те, що навіть після 4-го циклу перероблення паперу для гофрування вдається досягти значення показника опору стисненню зразка на короткій відстані в поперечному напрямку для марки Б-3 (0,9 кН/м) для параметрів № 5 і 6 та після 2-го циклу – для параметра № 7. Спостерігається втрата міцності переробленого волокна вже після 1-го циклу на 28 % з подальшим

уповільненням (приблизно на 7 % після кожного наступного циклу). Показник опору торцевому стисненню лабораторного зразка паперу в загальному знижується до 50 % після всіх циклів його перероблення.

Як видно із отриманих даних досліджень, спостерігається зниження міцності паперу для гофрування з кожним наступним циклом перероблення. В основному, це обумовлено зниженням паперотворних властивостей волокон. Таку поведінку можна пояснити зниженням здатності волокон до повторного набухання і гідратації, або зниженням гнучкості повторно змочених волокон із-за їх часткового незворотного ороговіння.

Для пояснення зміни показників міцності волокон павловнії зі збільшенням циклів перероблення наведено мікроскопічне дослідження поверхні лабораторних зразків паперу для гофрування після 0, 2-4 циклів перероблення. Результати дослідження зміни структури поверхні зразків паперу під час подальшого його перероблення отримано на мікроскопі iScope, IS.1053-PLMi, trino та показано на рис. 12.

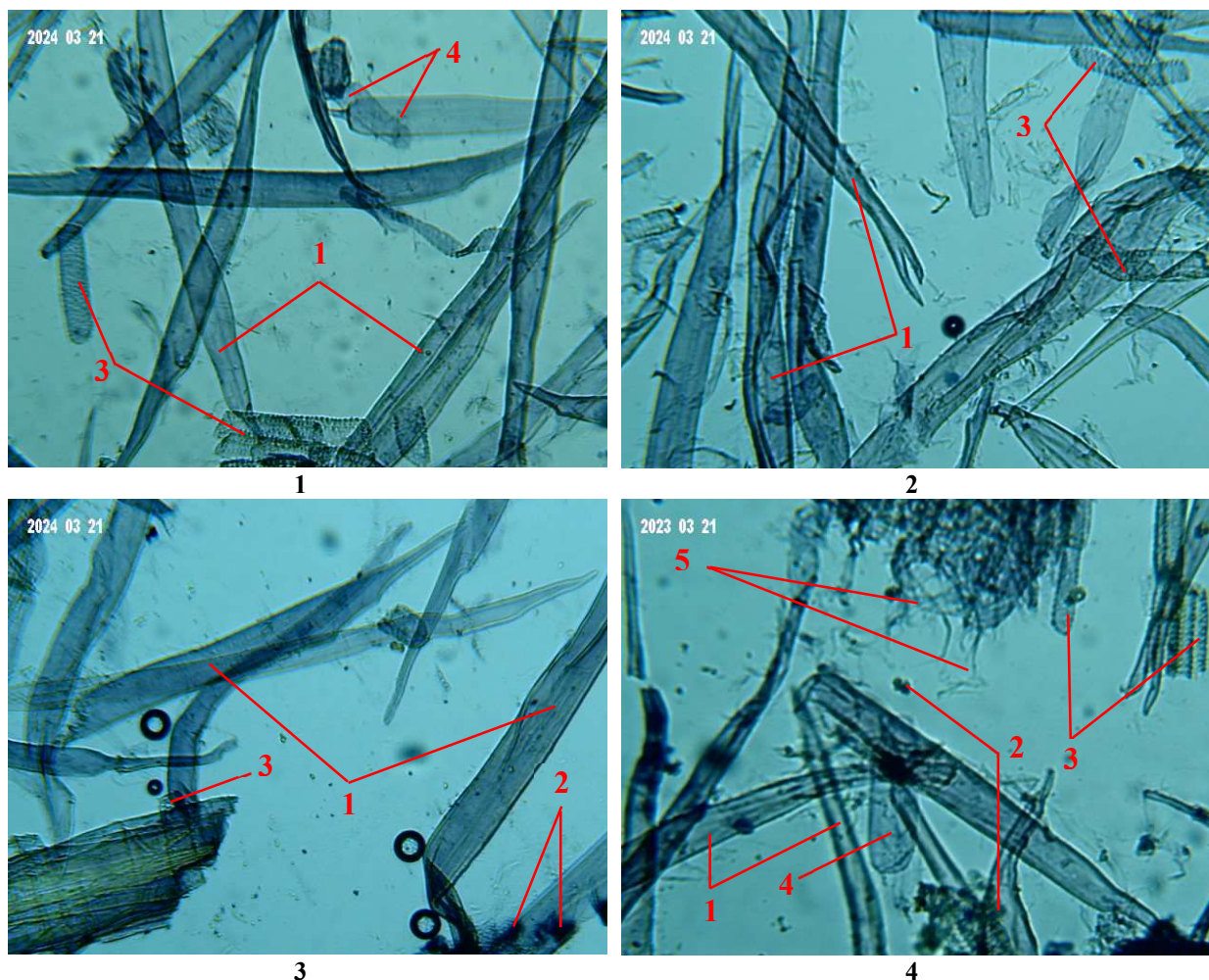


*1 – вихідний зразок; 2 – другий цикл перероблення;
3 – третій цикл перероблення; 4 – четвертий цикл перероблення*

Рис. 12 – Зміна структури поверхні паперу для гофрування від кількості циклів перероблення (збільшення – 20x 0,25)

Наведені мікрофотографії на рис. 13 демонструють, що зі збільшенням циклу перероблення паперу змінюється структура його поверхні: утворюються просвіти в результаті втрати частково дрібного волокна та нерівномірне розподілення волокон за рахунок зміни їх довжини та форми, а саме, наявності зігнутих та покручених волокон.

У роботі також досліджено зміну структури волокна зразків паперу, одержаних із натронних ВНФ, від кількості циклів перероблення за допомогою мікроскопа Bresser Biolux LCD 50x-2000x. Мікрофотографії наведено на рис. 13.

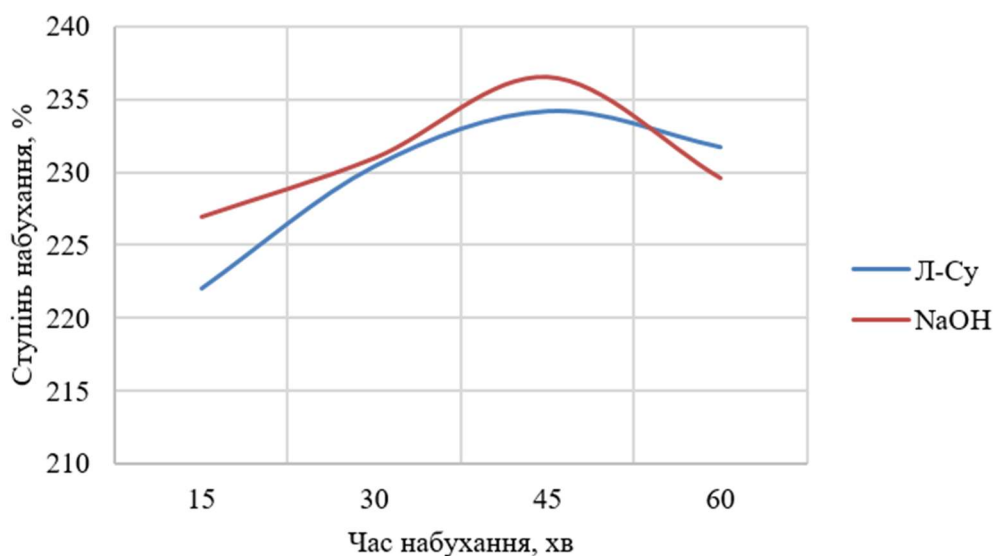


1 – вихідний зразок; 2 – другий цикл перероблення;
3 – третій цикл перероблення; 4 – четвертий цикл перероблення

Рис. 13 – Зміна структури волокон паперу для гофрування від кількості циклів перероблення (збільшення – 12,5x 10): 1 – волокно лібриформу (целюлози); 2 – лігнін; 3 – судина; 4 – паренхимна клітина; 5 – фібрили

Як видно із рис. 13, зі збільшенням циклів перероблення стінки волокон лібриформу втрачають строгу форму, мають хвилеподібний вигляд, волокна перекручені, зігнуті під різним кутом, а також спостерігається роздвоєння кінців. Необхідно відмітити наявність у масі дрібних фрагментів та значної кількості судин, які не втрачаються у ході підготовки маси та її перероблення, що позитивно впливає на ущільнення паперового листа та певні його властивості.

Схильність до ороговіння різних типів целюлозних волокон найбільш очевидна під час порівняння показника водопоглинання. Залежність ступеня набухання волокон, вивчених ВНФ від тривалості їх набухання наведено на рис. 14.



Л-Су – лужно-сульфитна делігніфікація; NaOH – лужна делігніфікація

Рис. 14 – Водопоглинання волокна

Професором Джайме у одній із своїх робіт, присвяченій темі водопоглинання волокна, показано [30], що з підвищенням рН середовища для целюлозних волокон спостерігається більш краще водопоглинання волокном. Таку поведінку можна пояснити тим, що геміцелюлози, які переважно покривають фібрили і відіграють роль зв'язуючого агента між лігніном і мікрофібрилами утворюють лігнінно-геміцелюлозний гель, який запобігає формуванню водневих зв'язків між мікрофібрилами під час висихання і тримає проміжки між фібрилами, які доступні для води. Однак під час розволокнення хімічних волокон у більш лужному середовищі чутливість лігнінно-геміцелюлозного гелю підвищується, що призводить до його зменшення за рахунок розчинення. Проте проходячи максимум значення, водопоглинання знову знижується за рахунок видалення інтенсивно набухлих геміцелюлоз, що характерно в більшій мірі для лужної целюлози у порівнянні із лужно-сульфитною.

Висновки. Повторне перероблення целюлозних волокон є стабільною тенденцією паперової промисловості світу. Отримане вторинне волокно характеризується зниженими паперотворними властивостями. З кожним циклом перероблення волокна все менше відновлюють свої властивості, тому це призводить до обмеження їх кількості використання. Основним поясненням можна вважати явище «незворотного ороговіння» волокон, що виражається в зниженій здатності до набухання, у меншій їх гнучкості та пластичності, укороченні довжини.

Досліджено папір для гофрування, виготовлений із лужно-сульфитних та натронних ВНФ, отриманих із листяної деревини павловнії. Це свого роду є новим і перспективним напрямом, оскільки все частіше для виробництва паперу використовують ВНФ із листяних порід деревини, однак, нині вони ще не достатньо вивчені щодо потенціалу використання повторно переробних волокон.

Показано, що показники міцності після перероблення паперу для гофрування знижуються зі збільшенням циклів перероблення. Треба відмітити, що папір для гофрування, отриманий із лужно-сульфитних ВНФ після чотирикратного перероблення зберігає потенціал міцності приблизно на третину. Проте після п'ятикратного перероблення паперу, виготовленого із ВНФ, отриманих натронним способом показники зберігаються в більшій мірі і складають майже половину від початкових, крім опору продавлюванню.

Після багаторазового перероблення (більше чотирьох разів) більшість фізичних характеристик стабілізується, хоча опір продавлюванню дещо знижується різкіше. Ступінь млива паперової маси майже не знижується, оскільки її не піддавали повторному розмелюванню.

Перспективи подальших досліджень. У подальших дослідженнях доцільно вивчити вплив циклічності на довжину волокон, а також використання волокнистих напівфабрикатів із деревини павловнії у композиції з іншими видами ВНФ.

Список використаної літератури

1. Production volume of paper and paperboard worldwide from 2010 to 2022, by type (in 1,000 metric tons). New York, 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/270317/production-volume-of-paper-by-type/> (дата звернення: 15.03.2024).
2. Paper-based food packaging at the centre of Europe's waste crisis, new report reveals. Brussels, 2023. URL: <https://eeb.org/paper-based-food-packaging-at-the-centre-of-europes-waste-crisis-new-report-reveals/> (дата звернення: 15.03.2024).
3. Oliveira de D.M., Bomfim de A.S.C., Benini K.C.C.d.C., Cioffi M.O.H., Voorwald H.J.C., Rodrigue D. Waste paper as a valuable resource: an overview of recent trends in the polymeric composites field // *Polymers*. 2023. Vol. 15(2), Issue 426. P. 1–24. doi: 10.3390/polym15020426.
4. Making energy consumption in the pulp and paper industry sustainable and future-proof. Billingsstad, 2023. URL: <https://energy-nest.com/energy-consumption-pulp-paper-industry/> (дата звернення: 15.03.2024).
5. Blechschmidt I., Vogel I. Zur Bestimmung des Wasserruckhatenvermogen von Farbstoffen // *Zellstoff und Papier*. 1981. Ausg. 1(30). S. 24–25.
6. Blechschmidt I., Vogel I. Morphologische und chemische Eigenschaften von Altpapierstoffen // *Zellstoff und Papier*. 1981. Ausg. 2. S. 113–118.
7. Jaume G., Büttel H. Concerning the determination and meaning of waterretention value of various bleached and unbleached cellulosic pulps // *Wochenblatt für Papierfabrikation*. 1968. Issue 96(6). P. 180–187.
8. Howard R.C. The effect of recycling on paper technology // *Paper Technology*. 1991. Issue 32(4). P. 20–25.
9. Howard R.C., Bichard W.J. The basic effect of recycling on pulp properties // *Journal of Pulp and Paper Science*. 1992. Issue 18(4). P. 151–159.
10. Nazhad M.M. Recycled fiber quality – A review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2005. Issue 11(3). P. 314–329.
11. Scallan A.M., Tydeman A.C. Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibres // *Journal of Pulp and Paper Science*. 1992. Issue 18(5). P. 188–193.
12. Čabalová I., Kačík F., Geffert A., Kačíková D. The effects of paper recycling and its environmental impact // *Environmental Management in Practice*. 2011. P. 329–350. doi: 10.5772/23110.
13. Page D.H. The beating of chemical pulps – The action and the effects // *Papermaking Raw Materials. Symposium*. 1989. Vol. 1. P. 1–37.
14. Sinke R.J., Westenbroek A.P.H. How to deal with the effects of recycling? // *Paper and Board: 8th Pira Paper Recycling Technology Conference*. (Prague, Czech Republic, 17–18 February 2004). Prague, 2004.
15. Ruvo A.D., Htun M. Fundamental and practical aspects of paper-making with recycled fibers // *The Role of Fundamental Research in Paper Making / J. Brander (ed.)*. London: Mechanical Engineering Pub., Ltd., 1983. Vol. 1. P. 195–225.
16. Weise U., Paulapuro H. Relation between fiber shrinkage and hornification // *Das Papier*. 1996. Issue 50(6). P. 328–333.
17. Ackerman Ch., Göttching L., Pakarinen H. Papermaking potential of recycled fiber // *Recycled Fiber and Deinking. Papermaking Science and Technology / L. Göttching, H. Pakarinen (eds.)*. Jyväskylä, 2000. Ch. 10. P.358–438.
18. Geffertová J., Geffert A. Recycling of the Hardwood Kraft Pulp // *Material Recycling – Trends and Perspectives*. 2012. P. 265–298. doi: 10.5772/33080.
19. Технологія недеревних волокнистих напівфабрикатів : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», освітньо-професійної програми «Промислова екологія та ресурсоефективні чисті технології» / Черьопкіна Р.І., Трембус І.В., Дейкун І.М., Барбаш В.А. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 231 с.
20. TAPPI T 222. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, GA: TAPPI Press, 2021.
21. TAPPI/ANSI T 412. Moisture in pulp, paper and paperboard. Atlanta, GA: TAPPI Press, 2022.
22. ДСТУ EN ISO 7263:2017. Папір для гофрування. Метод визначення опору площинному стисненню після лабораторного гофрування (EN ISO 7263:2011, IDT; ISO 7263:2011, IDT). Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Продукція целюлозно-паперової промисловості» (ТК 37), 2017. 18 с.
23. ДСТУ ISO 2759:2007 (ISO 2759:2001, IDT). Картон. Визначення опору продавлюванню. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України (ТК 37), 2007. 12 с.
24. ДСТУ 2334-93 (ГОСТ ИСО 1924/1-96). Папір та картон. Визначення міцності під час розтягування. Частина 1. Метод навантажування з постійною швидкістю. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України (ТК 37), 1997. 16 с.
25. TAPPI T 824 cm-23. Fluted edge crush of corrugating medium (flexible beam method). Atlanta, GA: TAPPI Press, 2023.

26. ISO 9895:2008. Paper and board. Compressive strength. Short-span test. Geneva: International Organization for Standardization, 2008.
 27. ДСТУ 7798:2021. Папір для гофрування. Технічні умови. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Продукція целюлозно-паперової промисловості» (ТК 37), 2021. 17 с.
 28. Барбаш В.А., Остапенко А.А. Влияние степени набухания волокон на физико-механические показатели бумаги // Упаковка. 2014. № 5. С. 29–32.
 29. Денисенко А.М., Черьопкіна Р.І. Використання лужно-сульфітного способу для перероблення деревини павловнії // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. № 4(34). С. 169–175.
 30. Jaume G., Mohrberg W. Quellungsmessungen an ligninhaltigen Holocellulose // Das Papier. 1949. Ausg. 3. P. 153–159.
-

Romaniia Cheropkina, Anna Denysenko, Svitlana Yatsenko, Oleksandr Kushmitko

THE INFLUENCE OF THE CYCLIC PERFORMANCE OF PAULOWNIA WOOD SEMI-FINISHED PRODUCTS ON THE STRENGTH INDICATORS OF CORRUGATED PAPER

Corrugated paper is a component of corrugated cardboard, which plays an important role in the formation of strength indicators, and its production in the last decade is one of the most developed sectors of the world pulp and paper industry.

The article scientifically substantiates the differences between primary and reprocessed fibers and explains the essence of “irreversible keratinization” of the fiber.

The paper examines the use of leafy semi-finished products obtained from paulownia wood by alkaline-sulfite and sodium methods for the production of corrugated paper with the study of the potential of its repeated processing. Patterns of decreasing paper strength indicators with increasing recycling cycles were obtained, which is explained by irreversible keratinization. It is shown that the use of semi-finished products obtained by the alkaline-sulfite method in the paper provides strength values for all indicators for the B-2 and B-3 grades after four times processing these fibers. It should be emphasized that in terms of absolute resistance to paper crushing, the obtained values meet the standards of the highest grade B-0 after a three-fold recycling cycle.

The obtained data on the repeated processing of paper from natron SFP show that the greatest decrease in mechanical strength indicators is observed after the first cycle of processing, especially the absolute resistance to pressing. However, after the second cycle of processing, according to this indicator, a margin of strength is preserved, which is enough for the norms of the B-2 and B-3 grades. After five times of recycling such paper, the strength indicators remain at almost 50 % of the initial ones, in contrast to alkaline-sulfite paper – after four times of recycling, the potential is approximately one-third.

Microphotographs of the paper surface and changes in fiber structure depending on the number of processing cycles confirmed the patterns obtained during the study.

Keywords: fibrous semi-finished products, paulownia, corrugated paper, keratinization, recycling cycles, strength indicators

References

1. Production volume of paper and paperboard worldwide from 2010 to 2022, by type (in 1,000 metric tons). Available at: <<https://www.statista.com/statistics/270317/production-volume-of-paper-by-type/>> (Accessed 15 March 2024).
2. Paper-based food packaging at the centre of Europe’s waste crisis, new report reveals. Available at: <<https://eeb.org/paper-based-food-packaging-at-the-centre-of-europes-waste-crisis-new-report-reveals/>> (Accessed 15 March 2024).
3. Oliveira de D.M., Bomfim de A.S.C., Benini K.C.C.d.C., Cioffi M.O.H., Voorwald H.J.C., Rodrigue D., 2023. Waste paper as a valuable resource: an overview of recent trends in the polymeric composites field. *Polymers*, vol. 15(2), no. 426, pp. 1–24. doi: 10.3390/polym15020426.
4. Making energy consumption in the pulp and paper industry sustainable and future-proof. Available at: <<https://energy-nest.com/energy-consumption-pulp-paper-industry/>> (Accessed 15 March 2024).
5. Blechschmidt I., Vogel I., 1981. Zur Bestimmung des Wasserruckhatenvermogen von Farbstoffen [To determine the water retention capacity of dyes]. *Pulp and Paper*, no 1(30), pp. 24–25.
6. Blechschmidt I., Vogel I., 1981. Morphologische und chemische Eigenschaften von Altparstoffen [Morphological and chemical properties of waste substances]. *Pulp and Paper*, no 2, pp. 113–118.

7. Jayme G., Büttel H., 1968. Concerning the determination and meaning of waterretention value of various bleached and unbleached cellulosic pulps. *Weekly paper for paper manufacturing*, no 96(6), pp. 180–187.
8. Howard R.C., 1991. The effect of recycling on paper technology. *Paper Technology*, no 32(4), pp. 20–25.
9. Howard R.C., Bichard W.J., 1992. The basic effect of recycling on pulp properties. *Journal of Pulp and Paper Science*, no 18(4), pp. 151–159.
10. Nazhad M.M., 2005. Recycled fiber quality – A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, no 11(3), pp. 314–329.
11. Scallan A.M., Tydeman A.C., 1992. Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibres. *Journal of Pulp and Paper Science*, no 18(5), pp. 188–193.
12. Čabalová I., Kačík F., Geffert A., Kačíková D., 2011. The effects of paper recycling and its environmental impact. *Environmental Management in Practice*, pp. 329–350. doi: 10.5772/23110.
13. Page D.H., 1989. The beating of chemical pulps – The action and the effects. *Papermaking Raw Materials Symposium*, vol. 1, pp. 1–37.
14. Sinke R.J., Westenbroek A.P.H., 2004. How to deal with the effects of recycling? *Paper and Board: 8th Pira Paper Recycling Technology Conference*. (Prague, Czech Republic, 17–18 February 2004). Prague.
15. Ruvo A.D., Htun M., 1983. Fundamental and practical aspects of paper-making with recycled fibers. In: J. Brander, ed. *The Role of Fundamental Research in Paper Making*. London : Mechanical Engineering Pub., Ltd., vol. 1, pp. 195–225.
16. Weise U., Paulapuro H., 1996. Relation between fiber shrinkage and hornification. *The Paper*, no 50(6), pp. 328–333.
17. Ackerman Ch., Götsching L., Pakarinen H., 2000. Papermaking potential of recycled fiber. In: L. Götsching, H. Pakarinen, eds. *Recycled Fiber and Deinking. Papermaking Science and Technology*. Jyväskylä, ch. 10, pp. 358–438.
18. Geffertová J., Geffert A., 2012. Recycling of the Hardwood Kraft Pulp. *Material Recycling – Trends and Perspectives*, pp. 265–298. doi: 10.5772/33080.
19. Cheropkina R.I., Trembus I.V., Deikun I.M., Barbash V.A., 2021. *Tehnologiya nederevnihi voloknistih napivfabrikativ : pidruchnik dlya stud. spetsialnosti 161 «Himichni tehnologiyi ta inzheneriya», osvithno-profesiynoiy programi «Promislova ekologiya ta resursoefektivni chisti tehnologiyi»* [Technology of non-wood fibrous semi-finished products : textbook for students. specialty 161 “Chemical technologies and engineering”, educational and professional program “Industrial ecology and resource-efficient clean technologies”]. Kyiv : Igor Sikorsky KPI.
20. Technical Association of the Paper and Pulp industry Press, 2021. TAPPI T 222 Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, GA: TAPPI Press.
21. Technical Association of the Paper and Pulp industry Press, 2022. TAPPI/ANSI T 412 Moisture in pulp, paper and paperboard. Atlanta, GA: TAPPI Press.
22. Technical standardization committee “Products of the pulp and paper industry”, 2017. DSTU EN ISO 7263:2017. Papir dlya gofruvannya. Metod viznachennya oporu ploschinomu stisnennyu pislya laboratornogo gofruvannya [Paper for corrugation. The method of determining the resistance to plane compression after laboratory corrugation]. Kyiv: TC 37.
23. Technical standardization committee “Products of the pulp and paper industry”, 2007. DSTU ISO 2759:2007. Karton. Viznachennya oporu prodavlyuvannya [Cardboard. Determination of compression resistance]. Kyiv: TC 37.
24. State consumer standard of Ukraine, 1997. DSTU 2334-93. Papir ta karton. Viznachennya mitsnosti pid chas roztyaguvannya. Chastina 1. Metod navantazhuvannya z postiynoyu shvidkistyu [Paper and cardboard. Determination of tensile strength. Part 1. Constant speed loading method]. Kyiv: TC 37.
25. Technical Association of the Paper and Pulp industry Press, 2023. TAPPI T 824 cm-23 Fluted edge crush of corrugating medium (flexible beam method). Atlanta, GA: TAPPI Press.
26. International Organization for Standardization, 2008. ISO 9895:2008 Paper and board. Compressive strength. Short-span test. Geneva: ISO.
27. Technical standardization committee “Products of the pulp and paper industry”, 2021. DSTU 7798:2021. Papir dlya gofruvannya. Tehnichni umovi [Paper for corrugation. Specifications]. Kyiv: TC 37.
28. Barbash V.A., Ostapenko A.A. Vliyanie stepeni nabuhaniya volokon na fiziko-mehaniicheskie pokazateli bumagi [The influence of the degree of swelling of fibers on the physical and mechanical properties of paper]. *Upakovka*, no 5, pp. 29–32.
29. Denysenko A.M., Cheropkina R.I., 2023. Viktoristannya luzhno-sulfitnogo sposobu dlya pereroblennya derevini pavlovniyi [Using the alkaline-sulfite method for processing paulownia wood]. *Vcheni zapiski Tavriyskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki*, no 4(34), pp. 169–175.
30. Jayme G., Mohrberg W., 1949. Quellungsmessungen an ligninhaltigen Holocellulose [Swelling measurements on lignin-containing holocellulose]. *The Paper*, no 3, pp. 153–159.