

УДК 676.166.6+676.24

*В.А. Барбаш, О.С. Якименко, О.В. Яценко***ВПЛИВ КОНОПЛЯНОЇ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПАПЕРУ
ДЛЯ ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ****Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна**

Описано екологічно безпечний процес одержання целюлози із волокон конопель і наноцелюлози методом кислотного гідролізу органосольвентної конопляної целюлози. Показано, що наноцелюлоза мала щільність $1,56 \text{ г/см}^3$, міцність на розрив $66,7 \text{ МПа}$, поперечний розмір наночастинок від 8 нм до 23 нм . Досліджено 10 варіантів додавання наноцелюлози у волокнисту масу паперу для пакування харчових продуктів або на його поверхню. Встановлено, що додавання наноцелюлози покращує показники якості паперу. Для досягнення вимог стандартів рекомендовано додавати 2% наноцелюлозу в масу або 3 г/м^2 на поверхню паперу. Показано, що додавання 2% наноцелюлози в масу підвищує руйнівне зусилля паперу на 47,9% та абсолютний опір продавлювання на 49,7%. Визначено, що нанесення 3 г/м^2 наноцелюлози на поверхню підвищує руйнівне зусилля паперу на 70,5% та абсолютний опір продавлюванню паперу на 67,1%. Даними скануючої електронної мікроскопії підтверджено, що додавання наноцелюлози на поверхню паперу приводить до закриття пор між целюлозними волокнами і нерівностей структури поверхні паперу, що підвищує його жиронепроникність. Доведено, що конопляна наноцелюлоза дозволяє на 50% скоротити витрати фенопрінту, синтезованого із нафти, та одержати папір для пакування харчових продуктів з меншим навантаженням на довкілля.

Ключові слова: волокно конопель, органосольвентна целюлоза, кислотний гідроліз, наноцелюлоза, папір для пакування харчових продуктів.

DOI: 10.32434/0321-4095-2023-151-6-5-12

Вступ

Зменшення запасів вичерпних викопних джерел (нафти, вугілля, газу) і збільшення їх вартості, а також забруднення довкілля пластичними масами з тривалим періодом біорозкладу та зростаючі обсяги викидів вуглецю потребують заміщення продуктів із вичерпних джерел вуглеводнів на матеріали, які виробляються із відновлювальної рослинної сировини. Біорозкладні матеріали із рослинної сировини як альтернатива полімерам і пластикам мають менший вуглецевий слід людської діяльності, а їх виробництво та використання сприятиме досягненню цілі, встановленої в Паризьких угодах, і спрямованої на «нульові» викиди до 2050 року [1].

До біоматеріалів відноситься целюлоза – найбільш поширена органічна сполука на Землі, яка за рахунок фотосинтезу щорічно продукується до $1,5 \cdot 10^{12}$ тон [2], а її виробництво розглядається як майже невичерпне джерело сировини для задоволення зростаючого попиту на біорозкладні матеріали. Целюлоза широко застосовується у виробництвах паперу і картону, етерів та естерів целюлози, мікрокристалічної та оксигелюлози. Целюлоза є основою для одержання наноцелюлози (НЦ), яка має унікальні властивості: еластичність та оптичну прозорість, високі значення міцності і питомої поверхні, біосумісності і стійкості до теплового розширення. НЦ має здатність до швидкого біологічного

© В.А. Барбаш, О.С. Якименко, О.В. Яценко, 2023



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Effect of hemp nanocellulose on the quality indicators of food packaging paper

розкладання і низьку вартість виробництва у порівнянні із синтетичними полімерами, що використовуються у виробництві композиційних матеріалів, у медицині та електроніці, будівництві, харчовій і целюлозно-паперовій промисловостях [3,4].

Наноцелюлозу одержують різними методами (механічними, хімічними та ферментативними), як правило, із целюлози хвойних і листяних порід деревини [5,6]. Для країн, які не мають великих запасів деревини, як альтернативне джерело для одержання целюлози розглядаються різні представники недеревної рослинної сировини (НДРС) – стебла злакових і волокна технічних культур. Основними перевагами НДРС є те, що їх переробка у целюлозу є більш економічною, можлива у невеликих об'ємах і за досить простими технологіями, які вимагають відносно невеликих капіталовкладень [7].

Потенційні ресурси НДРС постійно поновлюються і становлять більше 2,5 млрд т на рік [8]. Україна, як країна з розвиненим сільським господарством, щорічно вирощує велику кількість зернових і технічних культур, які можна застосовувати для одержання целюлози і наноцелюлози. Це стосується зокрема конопель (*Cannabis sativa L.*), які швидко ростуть і дають до чотирьох урожаїв на рік [9]. Різні частини конопель окрім текстильної промисловості використовуються для виробництва будівельних та ізоляційних матеріалів, паперу із конопляної целюлози, олії для харчових продуктів, палива з біомаси та в медицині [10]. За рахунок значної кількості геміцелюлози волокна конопель легко фібрилюються в процесі розмелювання, утворюючи жирну масу, що важливо для виробництва видів паперу з високою механічною міцністю та еластичністю.

Високі вимоги висуваються до паперу для пакування харчових продуктів, який традиційно виробляється із застосуванням хімічних допоміжних речовин (ХДР), одержаних переробленням вичерпаних природних джерел (нафти, газу,

вугілля), що мають довгий період біологічного розкладу та є екологічно небезпечними. Альтернативою таким ХДР є екологічно безпечні матеріали, зокрема наноцелюлоза, яка покращує показники якості картонно-паперової продукції, є біорозкладним і відновлюваним матеріалом [6].

Метою роботи є екстракція із волокон конопель наноцелюлози і дослідження можливостей її використання в процесі виготовлення одного із масових видів паперу – паперу для пакування харчових продуктів.

Для досягнення вказаної мети поставлено наступні завдання:

- одержати целюлозу із волокон конопель органосольвентним способом;
- екстрагувати наноцелюлозу методом кислотного гідролізу органосольвентної целюлози;
- виготовити та дослідити зразки паперу для пакування харчових продуктів з додаванням конопляної наноцелюлози;
- визначити витрати наноцелюлози, за яких папір відповідає вимогам стандарту.

Експериментальна частина

Як вихідну сировину використовували коноплі, вирощені у Житомирській області, волокна яких відсортовували від стебел, подрібнювали до розмірів 5–10 мм та зберігали в ексикаторі для підтримання постійної вологості. За стандартними методиками TAPPI [11] визначили хімічний склад волокон конопель, який порівняли з хімічним складом найбільш розповсюджених представників деревини та НДРС (табл. 1).

Як видно з даних табл. 1, волокна конопель містять більше 70% найціннішої частини рослинної сировини – целюлози, що істотно більше вмісту целюлози у хвойних і листяних породах деревини та у пшеничній соломі – одного із найбільшого за обсягом відходів сільськогосподарства України. За вмістом основних хімічних компонентів волокна конопель близькі до волокон льону, а вміст лігніну в них у 3–4 рази менший, ніж у деревині, і в 2 рази мен-

Таблиця 1

Хімічний склад волокон конопель, % від маси абсолютно сухої сировини

Сировина	Целюлоза	Лігнін	Речовини, що екстрагуються			Зольність
			гарячою водою	1%-вим NaOH	спирто-бензольною сумішшю	
Волокна конопель	73,9	8,8	4,2	20,2	1,9	1,6
Волокна льону	69,5	6,1	3,7	13,4	3,6	1,5
Солома пшениці	46,2	18,6	6,0	36,2	4,6	4,2
Сосна [12]	47,0	27,5	6,7	19,4	3,4	0,2
Береза [12]	41,0	21,0	2,2	11,2	1,8	0,5

ший, ніж у пшеничні соломі. Такі дані апіорі свідчать про необхідність менших витратах хімікатів в процесах одержання з них технічної целюлози у порівнянні з одержанням целюлози із деревини. Вміст речовин, що екстрагуються водою, у волокнах конопель знаходиться в межах між листяними і хвойними породами деревини, а речовин, що екстрагуються 1%-ним розчином луґу, – близький до значення цього показника для хвойних порід деревини, менший ніж у пшеничній соломі і перевищує майже в 2 рази значення цього показника для листяних порід деревини. Вміст речовин, що екстрагуються спирто-бензольною сумішшю, у волокнах конопель близький до значень цього показника для листяних порід деревини і менший, ніж для хвойної деревини, волокон льону і стебел пшеничної соломи. При цьому волокна конопель містять більше мінеральних речовин (золи), ніж деревина хвойних і листяних порід, що необхідно враховувати в процесах одержання целюлози і регенерації відпрацьованих варильних розчинів.

Для зменшення вмісту екстрактивних речовин волокна конопель обробляли 5%-ним розчином NaOH за гідромодуля 10:1, температури $97\pm 2^\circ\text{C}$ протягом 180 хвилин. Після промивання маси дистильованою водою до нейтрального рН проводили варіння целюлози у розчині льодяної оцтової кислоти і 30%-го пероксиду водню за співвідношення об'ємів 7:3 у термостійкій колбі, яка була з'єднана зі зворотнім холодильником для запобігання втрат компонентів варильного розчину. Варіння проводили за гідромодуля 10:1, температури $97\pm 2^\circ\text{C}$ протягом 180 хвилин. Після закінчення варіння одержану органосольвентну конопляну целюлозу промивали дистильованою водою і зберігали в герметичних пакетах для здійснення подальших досліджень, зокрема, визначення показників її якості (виходу, вмісту залишкового ліґніну та вмісту мінеральних речовин) та одержання наноцелюлози.

Для екстракції наноцелюлози проводили процес гідролізу органосольвентної конопляної целюлози 50%-им розчином сульфатної кислоти за гідромодуля 10:1, температури 60°C упродовж 90 хвилин. Промивання отриманої наноцелюлози проводили дистильованою водою до нейтрального значення показника рН методом центрифугаційного розділення. Ультразвукову обробку конопляної наноцелюлози проводили за допомогою ультразвукового дезінтегратора УЗДН-А (SELMI, Україна) з частотою 22 кГц упродовж 60 хв, а одержаний стабільний прозо-

рий гель наноцелюлози зберігали в герметичних ємностях для подальших досліджень.

Для виготовлення зразків паперу для пакування харчових продуктів використовували сульфатну вибілену целюлозу, яку розпускали і розмелювали в млині ЛРК (Україна) для забезпечення однорідності волокнистої суспензії та досягнення ступеня млива 75°ШР (Шоппер-Ріґлера). Відливки паперу масою 40 ± 3 г/м² одержували на листовідливному апараті за стандартною методикою з використанням ХДР фенопрінт з витратою 0,3%, що становить 50% від традиційної витрати фенопрінту на виробництві. Витрати конопляної НЦ становили від 0 до 2,0% від маси паперу та від 1 до 5 г/м² на поверхню паперу.

Морфологію поверхні і поперечного розрізу паперу спостерігали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) на мікроскопі РЕМ-106І (SELMI, Україна) з попереднім нанесенням на зразки шару золота методом напилення.

Фізико-механічні показники одержаних зразків паперу (щільність, руйнуюче зусилля, абсолютний опір продавлюванню, відносне видовження, жиронепроникність) визначали за прийнятими в паперовій галузі стандартами. Всі експерименти виконувались тричі, на основі яких розраховано середні значення з відносною похибкою менше 5%.

Результати та обговорення

Проведення процесу органосольвентного варіння волокон конопель за атмосферного тиску та невисокої температури дозволило одержати целюлозу з виходом 64,5%, залишковим вмістом ліґніну 0,16% і мінеральних речовин 0,13%. Одержана конопляна целюлоза за цими показниками близька до органосольвентних целюлоз з інших представників недеревної рослинної сировини – льону, кенафу, пшеничної соломи, міскантусу, очерету [13]. Це апіорі свідчить про те, що із органосольвентної конопляної целюлози можливо екстрагувати наноцелюлозу методом гідролізу за розробленими нами раніше технологіями [13].

За результатами проведених фізико-механічних випробувань встановлено, що отримана кислотним гідролізом конопляна наноцелюлоза мала щільність 1,56 г/см³ і міцність на розрив 66,7 МПа. Методом атомної силової мікроскопії показано, що поперечний розмір частинок наноцелюлози становив від 8 нм до 23 нм [14], що свідчить про можливість її використання як ХДР для покращення показників якості паперу.

Тому в роботі досліджено різні варіанти впливу конопляної наноцелюлози на показники якості паперу для пакування харчових продуктів з додаванням НЦ у волокнисту масу паперу та на його поверхню (табл. 2).

Визначено, що лабораторні відливи паперу мали масу 40 ± 3 г/м² і щільність $0,56 \pm 0,4$ г/см³. Як видно із наведених в табл. 2 даних, додавання НЦ у волокнисту масу або на поверхню паперу призводить до підвищення значень показника відносного видовження лабораторних зразків паперу в сухому і вологому станах. Одержана залежність пояснюється тим, що додавання НЦ сприяє утворенню додаткових водневих зв'язків між гідроксильними групами целюлози і НЦ, що приводить до збільшення значень видовження (еластичності) зразків паперу. Додавання наночастинок НЦ у волокнисту масу сприяє рівномірному розподілу між волокнами целюлози і заповненню порожнеч в матриці матеріалу. Це покращує структуру матеріалу, забезпечуючи збільшення опору деформації та розтягування під навантаженням, що підвищує значення показника відносного видовження.

Вплив НЦ на руйнівне зусилля зразків паперу в сухому і вологому стані для додавання НЦ у волокнисту масу (табл. 2, варіанти 1–6) наведено на рис. 1. Як видно із отриманих даних, збільшення вмісту НЦ у волокнистій композиції призводить до поступового зростання значень показника руйнівного зусилля. При цьому значення вимог стандарту показника руйнівного зусилля паперу для пакування харчових продуктів у сухому стані досягаються за витрати НЦ у масу від 1,5%. За витрати 2% НЦ від маси паперу спостерігається підвищення руйнівного зусилля одержаних зразків паперу на 47,9% (у

сухому стані) і на 74,4% (у вологому стані) у порівнянні зі значеннями цього показника без ХДР і, відповідно, на 31,1% і 45,3% у порівнянні з папером з додаванням в його композицію тільки 0,3% фенопрінту. Підвищення показника руйнівного зусилля відбувається за рахунок утворення нових додаткових водневих зв'язків між паперовою масою і частинками НЦ, що покращує стійкість зразків паперу до стиснення і здатність їх витримувати більші сили руйнування.

Вплив додавання НЦ у волокнисту масу на показник абсолютного опору продавлювання зразків паперу для варіантів 1–6 (табл. 2) наведено на рис. 2.

Із отриманих залежностей видно, що збільшення вмісту НЦ у композиції паперу призводить до покращення значень показника абсолютного опору продавлювання як у сухому, так і у вологому стані.

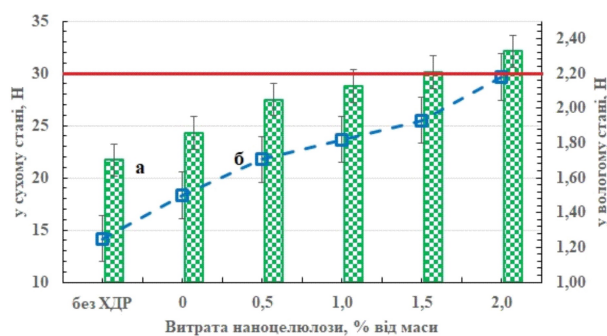


Рис. 1. Залежність руйнівного зусилля зразків паперу від витрати НЦ у масу в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальна лінія – вимога стандарту для паперу у сухому стані)

Таблиця 2

Варіанти додавання хімічних допоміжних речовин у волокнисту масу і на поверхню паперу для пакування харчових продуктів

№ варіанту	Витрати фінопрінту, % від маси	Витрати НЦ, % від маси	Витрати НЦ на поверхню, г/м ²	Відносне видовження, %	
				у сухому стані	у вологому стані
1	0	0	0	$1,36 \pm 0,06$	$0,59 \pm 0,03$
2	0,3	0	0	$1,87 \pm 0,09$	$1,06 \pm 0,05$
3	0,3	0,5	0	$2,04 \pm 0,10$	$1,47 \pm 0,07$
4	0,3	1	0	$2,23 \pm 0,11$	$1,64 \pm 0,08$
5	0,3	1,5	0	$2,28 \pm 0,11$	$1,76 \pm 0,09$
6	0,3	2	0	$2,31 \pm 0,12$	$1,85 \pm 0,09$
7	0,3	0	1,0	$2,81 \pm 0,14$	$0,72 \pm 0,04$
8	0,3	0	2,0	$4,11 \pm 0,19$	$0,80 \pm 0,04$
9	0,3	0	3,0	$4,68 \pm 0,22$	$1,51 \pm 0,07$
10	0,3	0	5,0	$5,14 \pm 0,24$	$1,92 \pm 0,09$

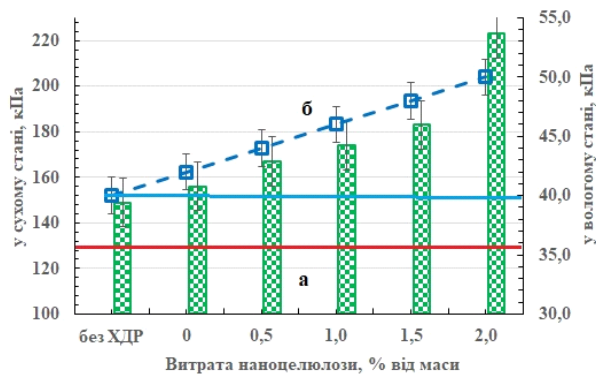


Рис. 2. Залежність абсолютного опору продавлюванню зразків паперу від витрати НЦ у масу в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальні лінії – вимоги стандарту для паперу у сухому (червона) і вологому (синя) стані)

Підвищення показника абсолютного опору продавлювання зразків паперу пояснюється утворенням додаткових зв'язків частинок НЦ, які мають високу поверхневу активність, з макромолекулами целюлози паперової маси, що сприяє утворенню більш міцних зв'язків між ними. Формування більш міцних зв'язків зменшує деформацію паперу під час дії на нього сил тиску і зберігає його цілісність. Наночастинки НЦ, як матеріал із високим модулем пружності, сприяють витримці більших значень деформації, перш ніж зразок паперу починає руйнуватися. Встановлено, що додавання НЦ у волокнисту масу з витратою 2% від маси паперу призводить до закономірного підвищення абсолютного опору продавлювання одержаних зразків паперу на 49,7% (у сухому стані) і на 25% (у вологому стані) у порівнянні із значеннями цього показника без ХДР і, відповідно, на 42,9% і 19,1% у порівнянні із зразками паперу тільки з додаванням 0,3% фенопрінту.

Підвищення показника руйнівного зусилля паперу в сухому і вологому стані спостерігається також у випадку додавання конопляної НЦ на його поверхню (рис. 3).

Як видно із рис. 3, нанесення суспензії НЦ на поверхню приводить до закономірного підвищення руйнівного зусилля одержаних зразків паперу в сухому і вологому стані у порівнянні із значеннями цього показника без ХДР та у порівнянні із зразками паперу тільки з додаванням 0,3% фенопрінту. Отримані залежності пояснюються утворенням більш гладкої та однорідної поверхні паперу з нанесення на неї наночастинок НЦ, що підтверджується даними СЕМ (рис. 4). Аналіз зображень СЕМ на рис. 4 свідчить про те, що нанесення суспензії НЦ на

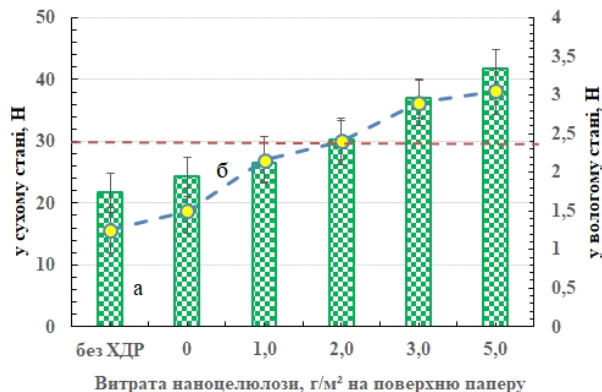


Рис. 3. Залежність руйнівного зусилля зразків паперу з додаванням НЦ на його поверхню в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальна лінія – вимога стандарту)

поверхню паперу призводить до закриття пор між целюлозними волокнами і нерівностей структури поверхні паперу (рис. 4, б і г), зменшенню можливості появи мікротріщин та інших дефектів, які могли б сприяти його руйнуванню. Тому збереження цілісності поверхні сприяє підвищенню показника руйнівного зусилля отриманих зразків паперу. Наведені на рис. 3 дані показують, що за витрати НЦ на поверхню 3 г/м² значення руйнівного зусилля паперу перевищують вимоги стандарту і підвищують руйнівне зусилля паперу на 70,5% (у сухому стані) і в 2,3 рази (у вологому стані) у порівнянні зі значеннями цього показника без ХДР та на 40,7% і 1,9 рази, відповідно, у порівнянні зі зразками паперу тільки з додаванням 0,3% фенопрінту.

Вплив витрати конопляної НЦ на показник абсолютного опору продавлювання зразків

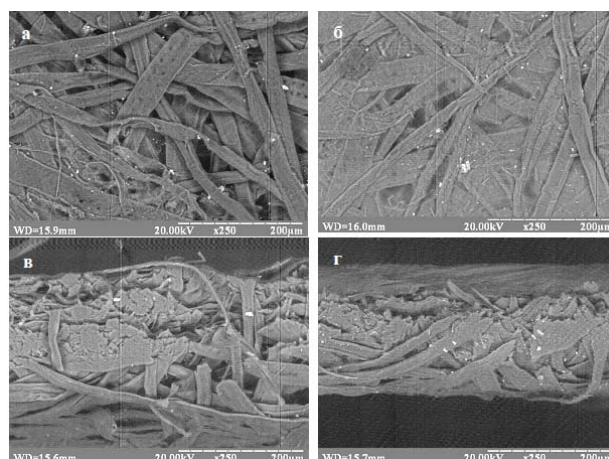


Рис. 4. Зображення СЕМ поверхні зразків паперу без нанесення (а) і з нанесенням (б) НЦ на їх поверхню, (в) і (г) – поперечний розріз зразків (а) і (б), відповідно

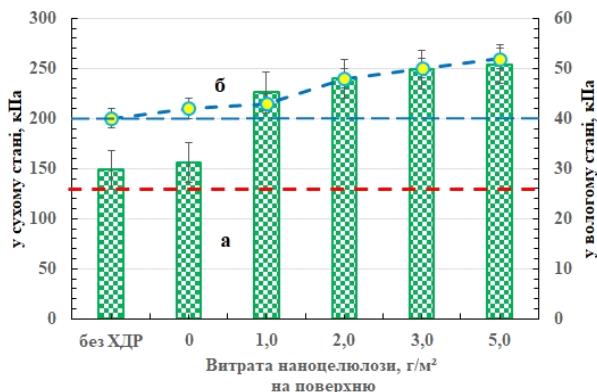


Рис. 5. Залежність абсолютного опору продавлюванню зразків паперу з додаванням НЦ на його поверхню в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальні лінії – вимоги стандарту для паперу у сухому (червона) і вологому (синя) стані)

паперу для варіантів 7–10 (табл. 2) із нанесенням суспензії НЦ на поверхню паперу наведено на рис. 5. Як видно із наведених даних, вже за витрату НЦ 1 г/м² показник абсолютного опору продавлювання перевищує вимоги стандарту для паперу як у сухому, так і у вологому стані. Збільшення чисельних значень показника з додаванням НЦ відбувається за рахунок збільшення поверхневої міцності за рахунок високої поверхневої активності наночастинок НЦ і закриттю нерівностей поверхні паперового зразка.

Це приводить до збільшення контакту та зчеплення між поверхнями НЦ і целюлозними волокнами, що забезпечує вищий опір продавлюванню паперу. Встановлено, що за витрати НЦ на поверхню 3 г/м² підвищує абсолютний опір продавлюванню паперу на 67,1% (у сухому стані) і на 25% (у вологому стані) у порівнянні зі значеннями цього показника без ХДР та на 59,6% і на 20%, відповідно, у порівнянні зі зразками паперу тільки з додаванням 0,3% фенопрінту.

Послідовне збільшення витрати суспензії НЦ на поверхню призвело до підвищення відносного видовження зразків паперу для пакування харчових продуктів (табл. 2), що пов'язане з утворенням міцної плівки за рахунок взаємодії наночастинок з поверхневими целюлозними волокнами паперу і підтверджується даними СЕМ (рис. 4). Така особливість взаємодії НЦ може бути особливо корисним для паперу, який піддається значним напруженням або розтягуванню, наприклад, у застосуваннях, де потрібна висока зносостійкість.

Наноцелюлоза має високу поверхневу енергію та здатність до утворення міцних зв'язків із целюлозними волокнами паперу, що покращує

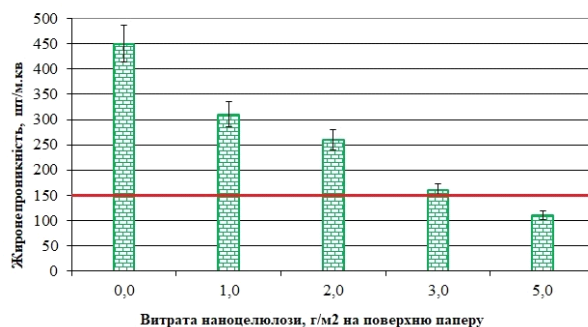


Рис. 6. Залежність жиронепроникності зразків паперу від витрати НЦ на його поверхню (горизонтальна лінія – вимога стандарту)

його фізико-механічні показники та його гідрофобність і жиронепроникність. Залежність жиронепроникності зразків паперу від витрати НЦ на його поверхню наведено на рис. 6.

Отримана залежність жиронепроникності від витрат НЦ свідчить про утворення наночастинок суспензії НЦ на поверхні паперу бар'єрного гідрофобного шару із заповненням пор та нерівностей структури поверхні паперу, що підтверджують експериментальні дані СЕМ (рис. 4) і призводить до зменшення показника жиронепроникності паперу. Як видно із даних рис. 6, додавання НЦ із витратою 3 г/м² поверхні паперу достатньо до досягнення вимог стандарту за показником жиронепроникності.

За результатами досліджень можна стверджувати, що використання суспензії конопляної наноцелюлози у волокнистій композиції або на поверхні паперу для харчових продуктів дозволяє частково (на 50%) замінити екологічно шкідливі хімічні допоміжні речовини у технологічному процесі виробництва паперу і картону.

Висновки

Додавання конопляної наноцелюлози у волокнисту масу або на поверхню паперу сприяє підвищенню його фізико-механічних показників і зменшенню його гідрофільності, що суттєво покращує його споживчі властивості і зменшує на 50% використання екологічно шкідливої хімічних допоміжних речовини фенопрінту, синтезованої із нафти.

Використання витрати суспензії конопляної наноцелюлози 2,0% у волокнисту композицію або від 3 г/м² на поверхню паперу дозволяє одержати зразки паперу для харчових продуктів, що задовольняють всім вимогам стандарту для такого виду продукції.

Отримані результати лабораторних досліджень можуть бути використані для розробки екологічно безпечних ресурсозберігаючих технологій переробки недеревної рослинної сировини у товари широкого споживання, зокрема, у виробництві паперу і картону, що матиме позитивний вплив на сталий розвиток агропромислового комплексу, економіку та екологію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Carbon footprint and feedstock quality of a real biomass power plant fed with forestry and agricultural residues* / Ilari A., Duca D., Boakye-Yiadom K.A., Gasperini T., Toscano G. // *Resources*. – 2022. – Vol.11. – No. 2. – Art. No. 7.
2. *Dufresne A.* Nanocellulose processing properties and potential applications // *Curr. Forestry Rep.* – 2019. – Vol.5. – P.76-89.
3. *Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications* / Trache D., Tarchoun A.F., Derradji M., Hamidon T.S., Masruchin N., Brosse N., et al. // *Front. Chem.* – 2020. – Vol.8. – Art. No. 392.
4. *Cellulose nanocomposites: fabrication and biomedical applications* / Blessy J., Sagarika V.K., Chinnu S., Nandakumar K., Sabu T. // *J. Bioresour. Bioprod.* – 2020. – Vol.5. – No. 4. – P.223-237.
5. *Charani P.R., Moradian M.H.* Utilization of cellulose nanofibers and cationic polymers to improve breaking length of paper // *Cellul. Chem. Technol.* – 2019. – Vol.53. – No. 7-8. – P.767-774.
6. *Nanocellulose-based products for sustainable applications: recent trends and possibilities* / Reshmy R., Philip E., Paul S.A., Madhavan A., Sindhu R., Binod P., et al. // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* – 2020. – Vol.19. – P.779-806.
7. *Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: background overview and future prospects* / Fahmy Y., Fahmy T.Y., Mobarak F., El-Sakhawy M., Fadel M. // *Int. J. Chem. Tech. Res.* – 2017. – No. 2(10). – P.424-448.
8. *Hunter R.W.* Non-wood fiber – 2010 and beyond. Prospects for non-wood paper production in Asia Pacific. – APPITA, 2010. – 56 p.
9. *Martinez B., Bernat-Maso E., Gil L.* Applications and properties of hemp stalk-based insulating biomaterials for buildings: review // *Materials*. – 2023. – Vol.16. Art. No. 3245.
10. *Parvez A.M., Lewis J.D., Afzal M.T.* Potential of industrial hemp (*Cannabis sativa L.*) for bioenergy production in Canada: Status, challenges and outlook // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2021. – Vol.141. – Art. No. 110784.
11. *TAPPI test methods*. – Atlanta, Georgia: Tappi Press, 2004.
12. *Smook G.A.* Handbook for pulp and paper technologists. 3rd edition. – Angus Wilde Publications Inc, 2003. – 425 p.

13. *Barbash V.A., Yashchenko O.V.* Preparation and application of nanocellulose from non-wood plants to improve the quality of paper and cardboard // *Appl. Nanosci.* – 2020. – Vol.10. – P.2705-2716.

14. *Extraction of organosolv pulp and production nanocellulose from hemp fibres* / Barbash V.A., Yashchenko O.V., Yakymenko O.S., Zakharko R.M. // *KPI Science News*. – 2021. – Vol.3. – P.83-90.

Надійшла до редакції 08.06.2023

EFFECT OF HEMP NANOCELLULOSE ON THE QUALITY INDICATORS OF FOOD PACKAGING PAPER

V.A. Barbash, O.S. Yakymenko, O.V. Yashchenko*
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

* e-mail: v.barbash@kpi.ua

An environmentally safe process for preparing cellulose from hemp fibers and nanocellulose by acid hydrolysis of organosolv hemp cellulose was described. It was shown that nanocellulose had a density of 1.56 g/cm³, a tensile strength of 66.7 MPa, and a transverse size of nanoparticles from 8 nm to 23 nm. Ten options for adding nanocellulose to the fibrous mass of food packaging paper or to its surface were studied. It was established that the addition of nanocellulose improves the quality of paper. To meet the requirements of the standards, it was recommended to add 2% nanocellulose to the mass or 3 g/m² to the surface of the paper. It was shown that the addition of 2% nanocellulose to the mass increases the destructive force of paper by 47.9% and the absolute resistance to pressing by 49.7%. It was determined that the application of 3 g/m² of nanocellulose on the surface increases the destructive force of paper by 70.5% and the absolute resistance to paper crushing by 67.1%. The data of scanning electron microscopy confirmed that the addition of nanocellulose to the paper surface leads to the closing of the voids between the cellulose fibers and the irregularities of the paper surface structure, which increases its grease resistance. It was stated that hemp nanocellulose allows reducing by 50% the consumption of phenoprint synthesized from oil and obtaining paper for packaging food products with less environmental impact.

Keywords: hemp fiber; organosolv cellulose; acid hydrolysis; nanocellulose; food packaging paper.

REFERENCES

1. Ilari A, Duca D, Boakye-Yiadom KA, Gasperini T, Toscano G. Carbon footprint and feedstock quality of a real biomass power plant fed with forestry and agricultural residues. *Resources*. 2022; 11: 7. doi: 10.3390/resources11020007.
2. Dufresne A. Nanocellulose processing properties and potential applications. *Curr Forestry Rep*. 2019; 5: 76-89. doi: 10.1007/s40725-019-00088-1.
3. Trache D, Tarchoun AF, Derradji M, Hamidon TS, Masruchin N, Brosse N, et al. Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications. *Front Chem*. 2020; 8: 392. doi: 10.3389/fchem.2020.00392.

4. Blessy J, Sagarika VK, Chinnu S, Nandakumar K, Sabu T. Cellulose nanocomposites: fabrication and biomedical applications. *J Bioresour Bioprod*. 2020; 5: 223-237. doi: 10.1016/j.jobab.2020.10.001.

5. Charani PR, Moradian MH. Utilization of cellulose nanofibers and cationic polymers to improve breaking length of paper. *Cellul Chem Technol*. 2019; 53(7-8): 767-774. doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.75.

6. Reshmy R, Philip E, Paul SA, Madhavan A, Sindhu R, Binod P, et al. Nanocellulose-based products for sustainable applications-recent trends and possibilities. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2020; 19: 779-806. doi: 10.1007/s11157-020-09551-z.

7. Fahmy Y, Fahmy TYA, Mobarak F, El-Sakhawy M, Fadl MH. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: background overview and future prospects. *Int J Chem Tech Res*. 2017; 2(10): 424-448. doi: 10.5281/zenodo.546735.

8. Hunter RW. *Non-wood fiber – 2010 and beyond. Prospects for non-wood paper production in Asia Pacific*. APPITA; 2010. 56 p.

9. Martinez B, Bernat-Maso E, Gil L. Applications and properties of hemp stalk-based insulating biomaterials for buildings: review. *Materials*. 2023; 16: 3245. doi: 10.3390/ma16083245.

10. Parvez AM, Lewis JD, Afzal MT. Potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for bioenergy production in Canada: status, challenges and outlook. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021; 141: 110784. doi: 10.1016/j.rser.2021.110784.

11. *TAPPI test methods*. Atlanta, Georgia: Tappi Press; 2004.

12. Smook GA. *Handbook for pulp and paper technologists. 3rd edition*. Angus Wilde Publications Inc; 2003. 425 p.

13. Barbash VA, Yashchenko OV. Preparation and application of nanocellulose from non-wood plants to improve the quality of paper and cardboard. *Appl Nanosci*. 2020; 10: 2705-2716. doi: 10.1007/s13204-019-01242-8.

14. Barbash VA, Yashchenko OV, Yakymenko OS, Zakharko RM. Extraction of organosolv pulp and production nanocellulose from hemp fibres. *KPI Sci News*. 2021; 3: 83-90. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.251456.