УДК 655.3.066.364

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШТУЧНОГО ЗНОШУВАННЯ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ БАНКНОТНОГО ПАПЕРУ

Т. Ю. Киричок, Є. Г. Сухіна,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

У статті проаналізовано передумови виникнення електрофізичних властивостей банкнотного паперу. Проведено аналіз взаємозв'язку електрофізичних властивостей банкнотного паперу та стадії його зношування. Виконано дослідження таких параметрів, як поверхневий і об'ємний опір, ємність і тангенс кута діелектричних втрат для двох типів банкнотного паперу з різними параметрами об'ємного проклеювання після їх штучного зношування. Результати досліджень показують, що електрофізичні властивості можуть використовуватись як показник зношування банкнотного паперу.

Ключові слова: *банкнотний папір, зношування, зносостійкість банкнот, поверхневий опір, об'ємний опір, показники зношування, об'ємне проклеювання паперу.*

Постановка проблеми. Підвищення зносостійкості банкнот є однією з основних тенденцій світового банкнотного виробництва. В Україні ця проблема постає також дуже гостро, особливо для банкнот низьких номіналів. Основними напрямами підвищення зносостійкості банкнот є методи підвищення зносостійкості шляхом застосування дизайнерських рішень, технологічні засоби, оптимізація матеріалів для виробництва банкнот, підвищення зносостійкості захисних ознак, збільшення зносостійкості фарбового шару. Для підвищення зносостійкості банкнот української гривні, як було встановлено [ТТД], доцільно зосередити увагу на виборі зносостійкої основи банкноти, а також технологічних методах підвищення зносостійкості банкнот. З огляду на це, актуальним є проведення науково-практичних досліджень з розробки нових та удосконалення наявних технологій контролю виробництва, а саме — методик оцінювання потенціалу і ефективності використання сучасних матеріалів для виготовлення спеціальних видів паперу, які дадуть змогу суттєво покращити зносостійкість банкнотної та поліграфічної продукції спеціального призначення.

Характеристики банкнотного паперу повинні забезпечити стабільність відтворення друкованого зображення. Крім того, властивості банкнотного паперу є надзвичайно важливим чинником забезпечення зносостійкості банкнотної продукції. Найбільшу увагу розробників в усьому світі привертають методи підвищення зносостійкості основи, до яких, зокрема, належать поверхнева та об'ємна обробка основи, використання багатошарового паперу. Сьогодні визначено такі напрями підвищення довговічності паперу: використання натуральних волокон або їх комбінації з синтетичними волокнами як композиційної основи паперу, що сприяє збільшенню поверхнево-міцнісних властивостей паперу; застосування спеціальних покриттів з метою створення

протизабруднювальних властивостей паперу — основних ресурсів збільшення строку їх служби [1].

У результаті теоретичного та експериментального вивчення процесів зношування банкнотного паперу визначено проблему пошуку методів об'єктивного оцінювання комплексного показника його зносостійкості.

Під час зношування банкнот накопичується забруднення на їхній поверхні та проникає в основу, порушується структурна цілісність та пошкоджуються волокна, збільшується повітропроникність та пористість паперу, що спричиняє зміни його електрофізичних характеристик, котрі можуть стати показником зношеності банкноти. Електрофізичні властивості паперу вивчали чимало дослідників, серед яких: Дж. П. Кейсі, В. Т. Ренне, Д. М. Флятте, Л. М. Вайсман. У всіх відомих дослідженнях наголошено на особливостях паперу як електроізоляційного матеріалу та способах формування потрібних для таких цілей фізичних та хімічних властивостей. Важливим напрямом дослідження електрофізичних властивостей паперу є вивчення закономірностей утворення статичної електрики під час друку та засобів подолання наслідків цього явища. Дослідження електрофізичних властивостей паперу стимулюються також його використанням під час процесу електрографії (ксерографії) в копіювальній техніці. Однак механізм формування електрофізичних властивостей банкнотного паперу та банкнот, котрі перебувають у складних умовах зношування, досі вивчений недостатньо. Це пояснюється, зокрема, й тим, що забруднювання є дуже складним процесом, який включає взаємодію бруду з компонентами паперової основи: волокнами, наповнювачем, проклеювальними речовинами, що підсилюється процесами фізико-хімічного та біологічного характеру.

Експериментальним шляхом визначено технологічні основи контролю зміни якості реальних банкнот та банкнот в імітаційних умовах реального обігу за зміною їх структурних та поверхневих властивостей, які базуються на теоретичному обґрунтуванні впливу неоднорідності структури цього продукту на характер залежностей його електрофізичних параметрів, що можуть бути використані як індикатор зношеності банкнот [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основною причиною вилучення банкнот у світі є забруднення. Для різних країн світу показник вилучених через забруднення банкнот варіюється в межах 64–81% загальної маси вилучених банкнот. Для українських банкнот цей показник становить 89,19% [3].

Електропровідність самого паперу виникає через гігроскопічну здатність паперу [4], наявність у складі паперу включень золи (2% маси) [5], введення в композицію хімічних домішок, синтетичних, металізованих захисних волокон та стрічок [4].

Всі поверхневі явища, які сприяють утриманню і закріпленню бруду на банкноті, що збільшує кількість електропровідних включень паперу під час обігу банкнот, полягають переважно у взаємодії енергетично незрівноважених поверхонь бруду та паперу за рахунок міжмолекулярних електростатичних

сил, сил Ван дер Ваальса та хемосорбції на поверхні волокон основи з проявленням водневих зв'язків.

Аналізуючи викладене, можна зробити висновок, що провідність банкноти забезпечується інтегральною величиною провідностей її еквівалентних шарів, а саме: еквівалентного шару целюлозних волокон, еквівалентного шару пор, еквівалентного шару поверхневого та об'ємного просочування. У процесі задруковування банкнотної основи додаються також еквівалентні шари поліграфічних фарб усіх видів, у процесі зношування — шар бруду.

Мета статті — створення засад формування та прогнозування зміни електрофізичних властивостей банкнотного паперу у процесі обігу та застосування цих властивостей як критеріїв евентуальної зносостійкості банкнот.

Виклад основного матеріалу дослідження. За об'єкт дослідження було обрано зразки банкнотного паперу двох видів, що є основою банкнот української гривні номіналом 10 грн. Оскільки кінцевий рівень показників механічної міцності паперу, його гідро- та оливофобність визначається за рахунок речовин проклеювання паперу, то для дослідження обрано два види паперу, а саме: з меламіно-формальдегідним проклеюванням та поліамід-епіхлоргідриним проклеюванням в масі. Як відомо, використання катіонних поліамід-епіхлоргідринових смол дає можливість значно підвищувати вологоміцність паперу [6].

Основні характеристики цих зразків подано в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики зразків банкнотного паперу

№ з/ч	Назва показника	Значення	
1	Вид паперу	Тиражний	Дослідний
2	Номінал, грн.	10	10
3	Кількість шарів	Одношаровий	Двошаровий
4	Проклеювання в масі	МФ*	ПЕ**
5	Поверхневе проклеювання	Речовини на основі PVOH	Речовини на основі PVOH
6	Маса паперу площею 1м^2, г	85,8	91,8
7	Товщина паперу поза водяним знаком, мкм	106±2	111±1
8	Поверхнева вбирність води, г/м^2 (Кобб60) – верхній бік паперу – сітковий бік паперу	 25,5±1,0 31,5±4,0	 13,4±3 14,2±2,5
9	Шорсткість, см3/хв. верхній бік /сітковий бік	337/368	368 / 330
10	Масова частка золи, %	2,5	3,0
11	Вологість, %	6,7	6,2

* – МФ — меламін-формальдегідне проклеювання, ** – ПЕ — поліаміно-епіхлоргідринове проклеювання.

З метою розроблення комплексних практичних рекомендацій для покращення показника зносостійкості українських банкнот, щоб визначити кореляційний аналіз впливу зношеності зразків паперу на їх електрофізичні параметри, було застосовано технологію їх прискореного зношування [7]. Ця технологія з певним ступенем достовірності штучно відтворює умови обігу у результаті використання зношувального та забруднювального агентів. Таким чином, експериментальні зразки піддавались різним механічним деформаціям за наявності забруднювальних речовин, що дало можливість провести порівняльні тести матеріалу цих зразків. Також було використано методику «сухого» штучного зношування, що передбачає наявність лише зношувального агента.

Зношування зразків банкнотного паперу проводилося циклічно (3 цикли по 10 хв), «сухе» — 1 цикл тривалістю 120 хв.

Експериментальні зразки паперу було досліджено під час прикладення напруги постійної та змінної величини.

Для визначення змін електропровідності паперу у процесі штучного зношування проведено вимірювання об'ємної та поверхневої електропровідності. Вимірювання об'ємної провідності проводилось у напрямку, що є перпендикулярним до поверхні аркуша з використанням стандартної методики [8] з вагою електроду напруги 6 кг (рис. 1). Еквівалентна електрична схема об'ємного опору банкнотного паперу може бути зображена у вигляді електричного кола послідовно з'єднаних резисторів, опір яких дорівнює опорам різних складників банкнотного паперу R_i (рис. 2 а). Об'ємний опір банкнотного паперу R_p^{volume} може бути визначений:

$$R_p^{volume} = \sum_{i-1}^{n} R_i, \qquad (1)$$

де n — кількість структурних складників банкнотного паперу.

$$R_p^{volume} = R_{fiber} + R_{str.el.} + R_{pores} + R_{surface_sizing} + R_{volume_sizing} + R_{soil}, \qquad (2)$$

де R_{fiber} — опір целюлозних волокон; $R_{str.el.}$ — опір захисних включень паперу (синтетичних волокон, металізованих волокон, захисних стрічок, тощо); R_{pores} — опір пор паперу, заповнених повітрям; $R_{surfase_sizing}$, R_{volume_sizing} — опори, що визначається речовинами поверхневого та об'ємного проклеювання відповідно, R_{soil} — опір, що визначається адсорбованими поверхнею паперу забрудненнями.

Показник об'ємного опору зазвичай застосовується для визначення структурних змін матеріалів.

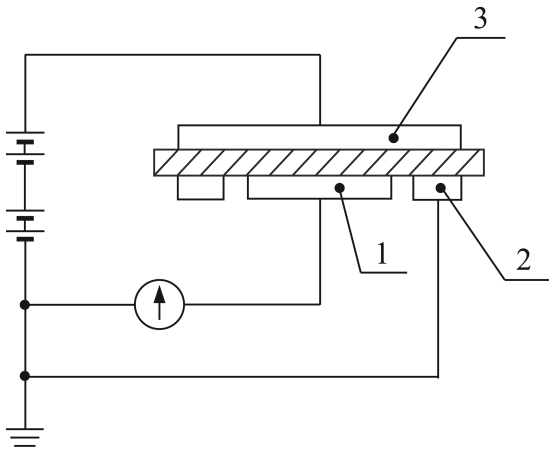


Рис. 1. Принципова схема з'єднання захищених електродів для вимірювання питомого об'ємного опору: 1 — вимірювальний електрод; 2 — захисний електрод; 3 — електрод напруги [8]

Для визначення стійкості поверхні банкнотного паперу до забруднення було використано показник поверхневої електропровідності. Оскільки при вимірюванні поверхневого опору струм проходить через поверхневий шар та включає струм через об'єм зразка [9], то еквівалентна електрична схема поверхневого опору банкнотного паперу може бути зображена у вигляді електричного кола паралельно з'єднаних резисторів, опір яких дорівнює опорам різних складників банкнотного паперу R_i (рис. 2 б). Об'ємний опір банкнотного паперу $R_p^{surface}$ може бути визначений:

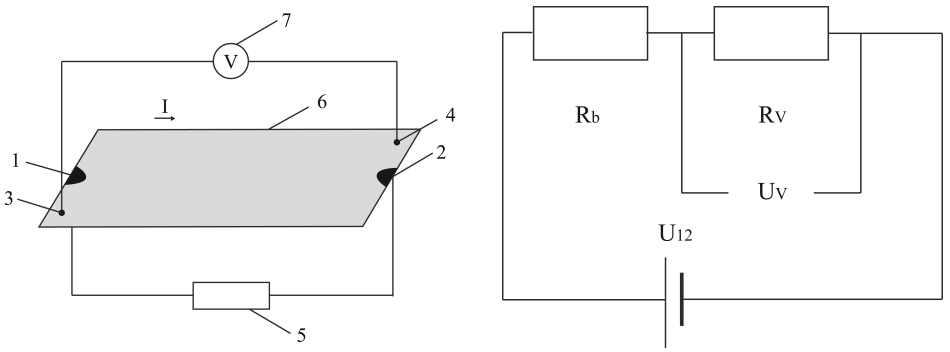
$$\frac{1}{R_p^{surface}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}, \tag{3}$$

де n — кількість структурних складників банкнотного паперу.

$$\frac{1}{R_p^{surface}} = \frac{1}{R_{fiber} + R_{s.e.} + R_{pores} + R_{volume_sizing}} + \frac{1}{R_{surface_sizing}} + \frac{1}{R_{soil}}, \tag{4}$$

де R_{fiber} — опір целюлозних волокон; $R_{str.el.}$ — опір захисних включень паперу (синтетичних волокон, металізованих волокон, захисних стрічок, тощо); R_{pores} — опір пор паперу, заповнених повітрям; $R_{surfase_sizing}$, R_{volume_sizing} — опори, що визначається речовинами поверхневого та об'ємного проклеювання відповідно, R_{soil} — опір, що визначається адсорбованими поверхнею паперу забрудненнями.

Вимірювання поверхневого опору було проведено відповідно до експериментальної методики, що полягає у вимірюванні напруги між крайовими частинами банкнот під час прикладення до суміжних крайових частин напруги сталої величини (рис. 3 а) [2].



а) б)

Рис. 2. а) схематичне зображення досліду: 1, 2 — точки прикладання напруги, 3, 4 — точки вимірювання спаду напруги, 5 — блок живлення (NES-75-24), 6 — експериментальний зразок, 7 — мультиметр (M830Buz); б) еквівалентна електрична схема вимірювань: U_{12} — прикладена напруга 10 В, R_V — вхідний опір вольтметра 1 МОм, R_b — опір ділянки банкноти

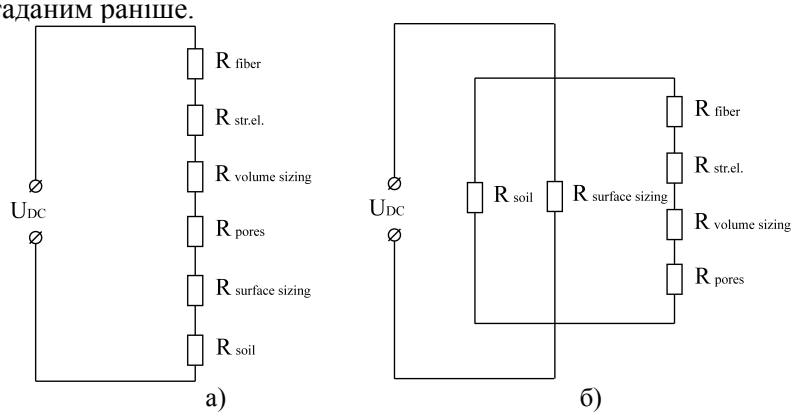
Оскільки опір вимірюваної ділянки паперу суттєво більший за вхідний опір мультиметра M830Buz, то еквівалентна схема вимірювання може бути спрощено представлена у вигляді резистивного дільника напруги (рис. 3 б). Враховуючи закон Ома для еквівалентної електричної схеми, маємо:

$$U_v = U \frac{R_v}{R_b + R_v}, \tag{5}$$

звідки

$$R_b = R_v \frac{U}{U_v} - R_v. \tag{6}$$

У випадку прикладання змінної напруги U_{AC} еквівалентну електричну схему банкнотного паперу можна зобразити у вигляді послідовно з'єднаних конденсаторів змінної ємності [1], що відповідають еквівалентним шарам паперу, згаданим раніше.



а) б)

Рис. 2. а) еквівалентна схема паперу (об'ємний опір); б) еквівалентна електрична схема (поверхневий опір)

На рис. 3 зображено еквівалентні електричні схеми паперу при вимірюванні ємності та кута діелектричних втрат.

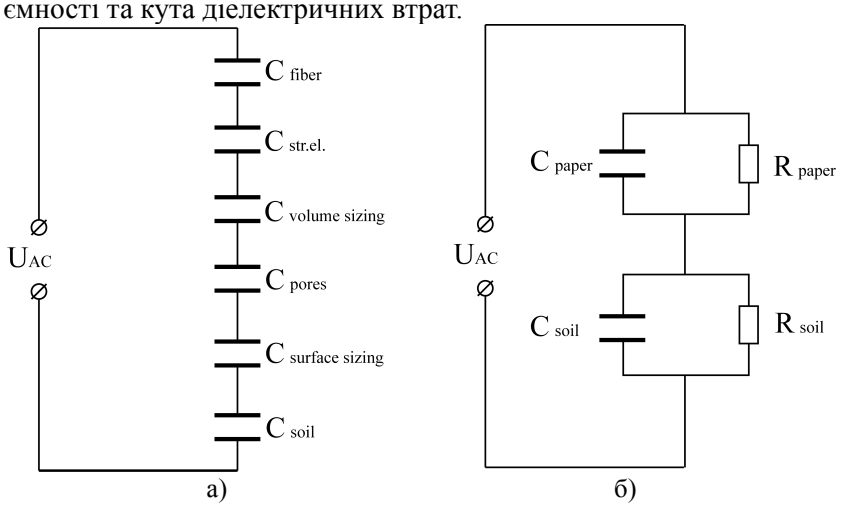


Рис. 3. а) еквівалентна схема паперу (ємність); б) еквівалентна електрична схема (тангенс кута діелектричних втрат)

Вимірювання ємності та тангенсу кута діелектричних втрат здійснено за допомогою цифрового вимірювача ємності Е8-4 при прикладенні змінної напруги частотою 1 кГц. Схему підключення електродів вимірювального блоку до зразка зображено на рис. 4.

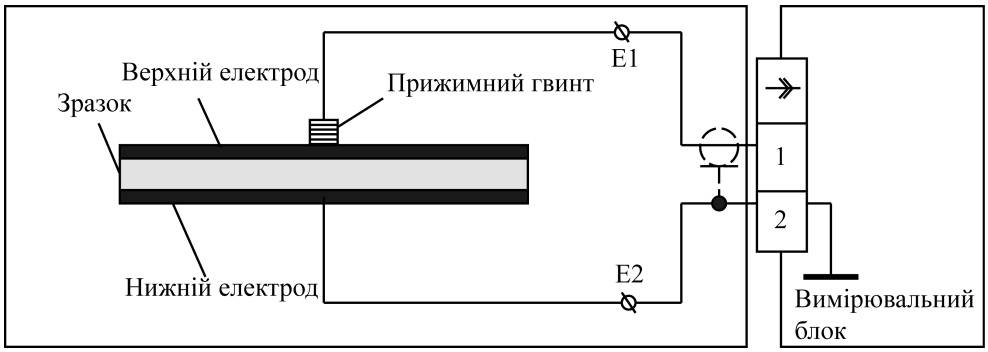


Рис. 4. Схема підключення електродів вимірювального блоку цифрового вимірювача ємності до зразка

З огляду на вплив температури та відносної вологості повітря на характеристики волокнистих матеріалів, перед початком вимірювань проводилася акліматизація зразків протягом 24 год. при температурі 22±0,1ºС, відносній вологості 50,0±2,0%.

Результати досліджень. Для дослідження стійкості до зношування експериментальних зразків банкнотного паперу було проведено вимірювання електрофізичних характеристик до та після трьох циклів штучного зношування (табл. 2, рис. 5).

Відносна зміна показників банкнотного паперу в процесі зношування розраховувалася за формулою:

$$\Delta x_p = \frac{x_{p0} - x_{p1}}{x_{p0}}, \tag{7}$$

де x_{p0} — середнє значення показника для незношених зразків, x_{p1} — середнє значення показника для зношених зразків.

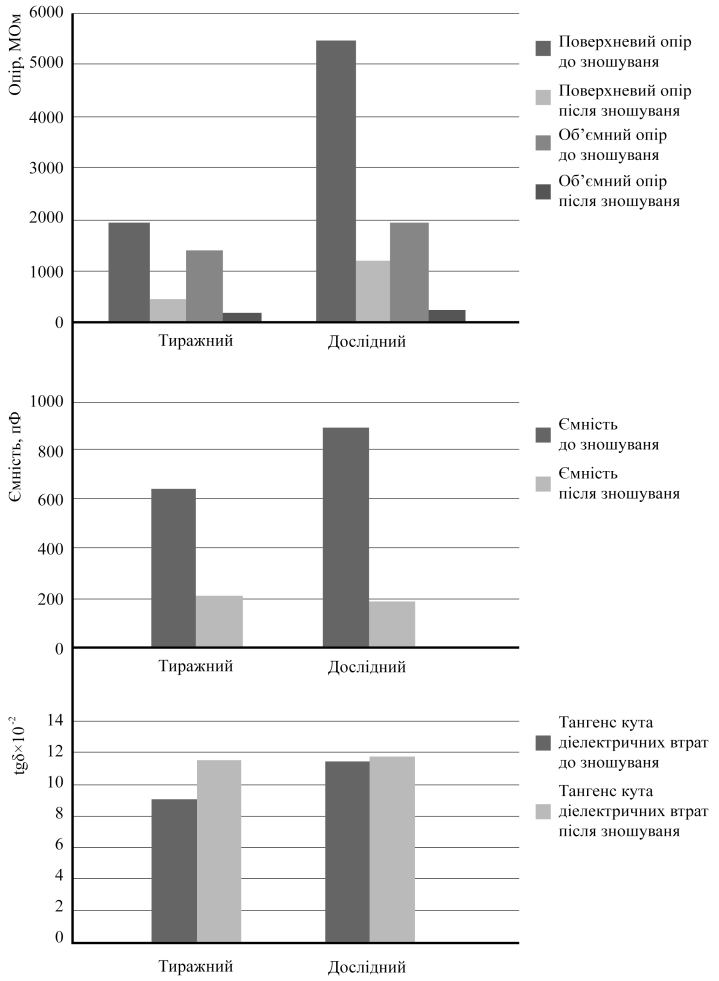


Рис. 5. Зміна електрофізичних параметрів експериментальних зразків банкнотного паперу

Дослідження об'ємного та поверхневого опору зразків показує, що тенденції зміни цих показників дуже суттєві як за наявності забруднювального агента під час зношування, так і без нього. Причиною зменшення об'ємного опору банкнотного паперу обох видів після процесу «сухого» зношування є збільшення пористості, що є результатом механічного деформування паперу

зношувальним агентом, а також збільшення рівноважної вологості паперу внаслідок вивільнення гідрофільних груп целюлозних волокон.

Таблиця 2

Зміна електрофізичних параметрів зразків банкнотного паперу

Параметри	«Вологе» зношування	«Сухе» зношування	Вид паперу	
			Тиражний	Дослідний
Поверхневий опір $R_p^{surface}$, МОм	-		1948,32	5449,09
	+		447,63	1198,95
Зміна опору, %	+		77,02	77,99
Об'ємний опір R_p^{volume}, МОм		-	1397,37	1933,33
		+	180,8	211,4
Зміна опору, %		+	87,06	89,07
Ємність, пФ		-	644,40	887,60
		+	212,01	187,8
Зміна ємності, %		+	67,1	79,8
$tg\delta \times 10^{-2}$		-	9,03	11,45
		+	11,34	11,81
Зміна $tg\delta$ %		+	-25,38	-3,14

У результаті зношування показник поверхневого опору зразків зменшився майже на 80% для обох видів паперу. Зважаючи на те, що показник поверхневої вбирності для дослідного паперу є майже удвічі меншим, ніж для тиражного паперу, можна зробити висновок щодо необхідності дослідження друкарсько-технічних характеристик цього паперу.

Зменшення ємності, а отже, і діелектричної проникності зразків паперу в результаті зношування відбувається за рахунок збільшення їх повітропроникності. Збільшення сумарного об'єму наскрізних пор, щілин та капілярів, що заповнені повітрям, з набагато меншою діелектричною проникністю ($\varepsilon_{pores}=1$), ніж у складових банкноти, призводить до зменшення діелектричної проникності всієї системи еквівалентних ємностей.

Фізично при збільшенні об'єму заповнених повітрям пор паперу відбувається збільшення напруги, що припадає на целюлозні волокна, що є сильно полярними компонентами, притому тангенс кута діелектричних втрат всієї системи має зростати, що і відбувається в результаті зношування експериментальних зразків.

Висновки. У дослідженнях встановлено зміни в результаті зношування таких показників банкнотного паперу: поверхневого (на 77,02 % для тиражного паперу, 77,99 % для дослідного паперу) та об'ємного опору (на 87,06 % для тиражного паперу і 89,07 % для дослідного паперу), ємності (на 67,1 % для тиражного паперу, 79,8 % для дослідного паперу) та тангенса кута діелектричних втрат (на 25,38 % для тиражного паперу, 3,14 % для дослідного паперу),

що є практичним обґрунтуванням взаємозв'язку електрофізичних параметрів різних видів банкнотного паперу та ступеня їх зношеності. Це є підґрунтям для розроблення методологічної основи об'єктивного оцінювання ступеня зношеності банкнот, що дає змогу враховувати зміни не тільки механічно-структурних властивостей паперової основи банкнот, а й прогнозувати зміну якості майбутньої банкнотної продукції.

Показник поверхневого опору є надзвичайно чутливим до забруднення банкнотного паперу. Для експериментальних зразків його зміна відбулась майже на 80%. Як напрям подальших досліджень рекомендується провести аналіз можливих комбінацій розташування вимірювальних електродів та електродів напруги за обраної експериментальної методики вимірювання показника поверхневого опору з висуненням рекомендацій щодо їх оптимального розташування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Киричок Т. Ю. Зносостійкість банкнотної продукції: моног. / Т. Ю. Киричок. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — 308 с.
2. Влияние износа на электрофизические параметры банкнот / Т. Ю. Киричок, В. М. Кириленко, Е.Г. Сухина // Известия ВУЗов. Проблемы полиграфии и издательского дела. — Москва, 2013. — №6. — С. 3–12.
3. Киричок Т. Ю., Мельниченко А. А., Нестеренко В. М. Аналіз зносостійкості банкнот української гривні в умовах реального обігу / «Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»». — 2013. — №2. — С. 94–104.
4. Фляте Д. М. Свойсва бумаги / Д. М. Фляте. — М. : Лесн. Промышленость, 1986. — 680 с.
5. C. Ververis. Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements / C. Ververis, K. Georghiou, D. Danielidis, D.G. Hatzinikolaou, P. Santas, R. Santas, V. Corleti // Bioresource Technology. — 2007. — Vol. 98. — P. 296–301.
6. Никольский Б. П., Григоров О. Н., Позин М.Е. и др. Справочник химика: Т. 6. / Б. П. Никольский. — 1968 г.
7. Kyrychok Tetiana. Banknote Paper Deterioration Factors: Circulation Simulator Method / Tetiana Kyrychok, Anatolii Shevchuk, Victor Nesterenko, Petro Kyrychok // BioResources. — 2014. — Vol. 9 (1). — P. 710–724.
8. IEC 60093, Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials.
9. Borch J., Lyne M. B., Mark R.E., Habeger C. Handbook of Physical Testing of Paper: Vol. 2. — CRC Press, 2001. — 560 p.

REFERENCES

1. Kyrychok T. (2014). Znosostiikist banknotnoi produktsii: monohrafiia (in Ukrainian)
2. Kyrychok T., Kyrylenko V., Sukhyna Y. (2013). Vlijanie iznosa na jelektrofizicheskie parametry banknot [Title of article]. Izvestija VUZov. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela, vol. 6 (in Russian)
3. Kyrychok T., Melnychenko A., Nesterenko V. (2013). Analiz znosostiikosti banknot ukrainskoi hryvni v umovakh realnoho obihu [Title of article]. Naukovi visti Natsionalnoho

tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut» vol. 2, pp. 94-104 (in Ukrainian)
4. Fljate D. (1986) Svojsva bumagi. Moscow: Lesn. Promyshlenost' (in Russian)
5. Ververis C., Georghiou K., Danielidis D., Hatzinikolaou D., Santas P., Santas R., Corleti V. (2007). Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements [Title of article]. Bioresource Technology, vol. 98, pp. 296–301 (in English)
6. Nikol'skij B., Grigorov O., Pozin M. (1968). Spravochnik himika, vol. 6. (in Russian)
7. Kyrychok T. (2014). Banknote Paper Deterioration Factors: Circulation Simulator Method. BioResources, vol. 9 (1), pp. 710–724 (in English)
8. IEC 60093, Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials
9. Borch J., Lyne M. B., Mark R.E., Habeger C. (2001) Handbook of Physical Testing of Paper, CRC Press: vol. 2. pp. 560 (in English)

RESEARCH OF SIMULATED DETERIORATION INFLUENCE ON ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF BANKNOTE PAPER

T. Kyrychok, Y. Sukhina

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
37, Peremogy St, Kyiv, 03056, Ukraine
t_kyrychok@ukr.net, liza_sukhina@ukr.net

The article analyzes the emergence of preconditions electrophysical properties of banknote paper, mechanisms of degradation of the banknote paper in circulation. An analysis of the correlation of the interrelation of electrophysical properties of banknote paper and its stage of detioration. Research of the parameters such as surface and volume resistance, capacitance and dielectric loss tangent for the two types of banknote paper with different volume sizing carried out. Banknote paper electrical circuits for measuring of these indicators are shown. Research results show that electrophysical properties are a measure of degradation of banknote paper.

Keywords: *banknote paper, deterioration, banknote durability, surface resistance, volume resistance, deterioration parameters, volume sizing*

Стаття надійшла до редакції 07.09.2015.
Received 07.09.2015.