

УДК: 676.226; 655.531; 655.3.066.22  
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.165856

## Дослідження взаємодії різних типів задруковуваних матеріалів з рідинами

К. І. Золотухіна, С. Є. Хаджинова, О. М. Величко, Б. Р. Кушлик,  
О. І. Кушлик-Дивульська

*Досліджено взаємодію паперів та плівок з тестовою рідиною. Проведено вимірювання крайового кута змочування залежно від виду субстрату та його морфології. Визначено лінійні розміри паперу при зволоженні зразків дистильованою водою, а також досліджено динаміку проникнення води в структуру паперу. Виконано контроль якості всотування рідини паперами. Дослідження позначених показників є необхідним при створенні принципово нових матеріалів для друку. Такі вимірювання дозволяють визначити можливість використання існуючих матеріалів в конкретному технологічному процесі виготовлення поліграфічної продукції.*

*Встановлено взаємозв'язок між ступенем зволоження задрукованого матеріалу та його друкарсько-технічними властивостями. Зпрогнозовано взаємодію системи «задруковуваний матеріал – рідина». Визначено вплив пар компонентів на друкарські процеси. Досліджено придатність матеріалів до задруковування струминним способом і можливість їх використання в плоскому офсетному друці зі зволоженням друкарських форм. При цьому враховувалася можливість забезпечення нормованих значень колірних характеристик відбитків.*

*Проведена перевірка висунутих гіпотез на відповідність математико-статистичним твердженням достовірності. Проведено розрахунок величин кореляції і встановлення кореляційних зв'язків. Математично доведено, що найбільший опір проникненню води залежить від показника пористості і поверхневого об'єму води. А також значно сильніше залежить від змочування поверхні паперу, ніж від вимірюваного поверхневого об'єму води. Тобто при виборі задруковуваних матеріалів, потрібно обов'язково враховувати пористість субстрату, ступінь його змочування рідиною. Дані, отримані шляхом вимірювання таких показників, дозволяють прийняти рішення про можливість задруковування матеріалу різними способами. Результати дослідження дозволять забезпечити стабільність технологічного процесу і отримання репродукцій з нормованими показниками оптичної густини і колірними відмінностями не більше 5 одиниць*

*Ключові слова: задруковуваний матеріал, поліграфічна продукція, струминний друк, крайовий кут, змочування поверхні*

### 1. Вступ

Взаємодія задрукованого матеріалу з рідинами передбачена багатьма технологічними процесами поліграфічного виробництва. Сюди відносяться: використання зволожувального розчину, друкування водно-фарбовою

емульсією у плоскому офсетному способі друку [1], використання чорнил у струминному способі [2], водорозчинних фарб у флексографічному тощо. Вибір технологічного процесу визначає характер взаємодії складників технологічного середовища друкарського контакту та особливості формування зображення репродукцій [3]. Але зміна всотувальної здатності субстратів найбільш впливова при використанні саме малов'язких фарб (чорнил для струминного друку). Взаємодія задрукованого матеріалу з рідиною відбувається за короткий проміжок часу, а морфологія поверхні та умови технологічного процесу визначатимуть наявність або відсутність дефектів на отриманих відбитках, стабільність процесу друкування та кольоровідтворення [4].

Отже, на якість відбитків значно впливає вид задрукованого матеріалу та ступінь змочування його поверхні. Зокрема, процес утворення фарбового шару на пористих поверхнях, пов'язаний із фізичними явищами проникнення фарбових речовин у структуру задрукованого матеріалу, потребує хорошого змочування, що є необхідною умовою отримання фарбового покриття бездефектної структури [5].

У випадку невсотувальних задруковуваних матеріалів важливими є явища міжмолекулярної взаємодії між контактуючими системами, а також друкарські й реологічні властивості фарб. Досягненню хорошої якості друку можуть перешкоджати статична електрика, накопичена на поверхні задрукованого виробу, а також висока інертність цієї поверхні [6]. Невсотувальні задруковувані матеріали, плівки, пластики, подекуди дизайнерські матеріали, мають малу поверхневу енергію, недостатню для змочування їх фарбами чи іншими рідинами та потребують додаткової обробки різними методами для поліпшення адгезійних властивостей [7].

Вимоги до якості витратних матеріалів, напівфабрикатів, готової поліграфічної продукції постійно зростають. Це сприяє постійному пошуку методів і засобів удосконалення технологій, які спрямовані на забезпечення стабільності перенесення фарби на задруковуваний матеріал, формування репродукцій, отримання нормованих кольорних показників відбитків.

Проблеми в процесі друкування можуть виникати в момент взаємодії задрукованого матеріалу та рідини і в процесі перенесення (проникнення) рідини (водно-фарбової емульсії [8], чорнил тощо) в товщі матеріалу. Саме тому доцільно дослідити взаємодію різних типів задруковуваних матеріалів з рідинами шляхом проведення експериментального дослідження та встановити можливість їх використання у різних технологічних процесах отримання репродукцій, що є актуальним науково-технічним завданням.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

На задруковуваний матеріал переноситься така кількість рідини (фарби), яку можна представити у вигляді функції  $y=f(h_{\text{ф}}, S_{\text{еф}})$ , де  $(h_{\text{ф}})$  – кількість фарби, що подається на задруковуваний матеріал;  $(S_{\text{еф}})$  – ефективна площа поверхні контакту між задруковуваним матеріалом і фарбою, яка залежить від характеру поверхні і структурно-механічних властивостей задрукованого матеріалу, реологічних властивостей рідини, швидкості друкування [6, 9]. Багато чинників

друкарського контакту впливають на товщину і рівномірність нанесення фарбового шару. Нормовані реологічні, адгезійні та змочувальні властивості фарби, відповідність морфології поверхні задрукованого матеріалу – ці та інші чинники сприятимуть досягненню однорідного, рівномірного шару на відбитку.

Так, у роботі [10] досліджено зміну шорсткості задрукованого матеріалу в процесі друку і показана повнота заповнення фарбою нерівностей при флексографічному друці. У роботі [11] досліджено адгезійні властивості плівок шляхом визначення їх поверхневої енергії та термодинамічної роботи адгезії фарби до поверхні цих плівок. Вплив складу паперу на формування його властивостей ретельно вивчено авторами роботи [12]. Зокрема, досліджувалася система «сировина – папір – відбиток» за запропонованим алгоритмом комплексного оцінювання якості друку. Введення вторинних волокнистих матеріалів до складу паперу дозволило зменшити швидкість первинного закріплення фарби на відбитку. При цьому встановлена відповідність оптичної густини денситометричним стандартам. Однак не вивчалася можливість використання матеріалу для отримання репродукцій іншими способами із принципово різними властивостями системи «задрукований матеріал – відбиток».

Текстурні характеристики поліграфічних видів паперу і картону, їх визначення з врахуванням даних про кінетику поглинання рідини вивчено в роботі [13]. Зокрема, досліджено кінетику поглинання уайт-спіриту та знайдені об'ємні константи швидкості всотування, виявлено існування шести основних типів кінетичних залежностей. Фактори впливу на процес перенесення та формування відбитка серед яких найвагомішими є вид задрукованого матеріалу та наявність захисного покриття тощо, ґрунтовно викладено в роботі [14]. Вплив властивостей паперу на якість цифрових відбитків також неодноразово вивчався науковцями. Зокрема, вплив технології виготовлення паперу на якість репродукцій, віддрукованих струминним способом, досліджено у роботі [15]. Покриття паперової основи спеціальними компонентами дозволило отримувати чіткі відбитки струминним способом з ширшою колірною гаммою, проте придатність запропонованого матеріалу для інших технологічних процесів не досліджувалася [16].

За допомогою мікроскопії, денситометрії, спектрофотометрії досліджували зразки віддруковані цифровим способом при однакових умовах на різних типах паперу. Результати показали, що зменшення шорсткості поверхні збільшило оптичну густину і якість друку [17]. Натомість [18] встановлено, що вибір чорнила для струминного способу не впливає на час проникнення рідини в товщі матеріалу. На ступінь проникнення впливає зовнішній тиск, викликаний впливом крапель чорнила та поверхневий натяг матеріалу. Запропонована математична модель [19], при застосуванні якої, можна розрахувати максимальний діаметр розтікання крапель чорнила у паперовому полотні. Проте модель враховує лише гідродинамічні характеристики краплі чорнила та фізичні характеристики паперового покриття. Модель не може бути

застосована до інших поліграфічних систем, наприклад для використання паперу у офсетному способі тощо [19].

Деталізація сутності перетворень, що відбуваються у друкарському контакті, запропоновані засоби вдосконалення технологічних процесів тощо, відображають вирішення окремих аспектів. Однак недостатньо увиразнено причини, що впливають на формування проблем у процесі взаємодії задруковуваних матеріалів з рідинами та їх перенесенні в товщі паперу.

Таким чином, проблеми підбору компонентів системи «задруковуваний матеріал – відбиток», контролю перенесення рідини у товщі матеріалу у процесі друкування, взаємодії з папером/плівками, існують і потребують подальшого увиразнення та вивчення. Запобігання утворення надмірної лінійної деформації матеріалу, контролювання динаміки проникнення рідини у матеріал має перспективи удосконалення.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Мета роботи полягала у експериментальному дослідженні взаємодії різних типів задруковуваних матеріалів з рідинами та вплив структурних характеристик, морфології поверхні на якість кінцевих репродукцій.

Для досягнення поставленої мети слід було вирішити наступні задачі:

- визначити крайовий кут змочування залежно від виду задрукованого матеріалу та його морфології;
- визначити лінійні розміри паперу при зволоженні зразків дистильованою водою;
- визначити динаміку проникнення води в структуру паперу, контроль якості просочування паперів та взаємозв'язок з друкарсько-технічними властивостями матеріалу;
- математично обґрунтувати залежність найбільшого опору проникнення води від показників пористості і поверхневого об'єму води.

### **4. Матеріали та методи дослідження взаємодії задруковуваних матеріалів з рідинами**

#### **4. 1. Досліджувані матеріали та засоби, що використовувались в експерименті**

Для проведення експериментальних досліджень відібрано чотири типи задруковуваних матеріалів, що різнилися складом та характеристиками поверхні, від пористої, всотувальної до невсотувальної структури. Процес вибору матеріалів ґрунтувався на можливості їх використання у різних технологічних процесах виготовлення поліграфічної продукції із використанням рідин в тому числі. Відібрані матеріали, при правильному підборі компонентів технологічного процесу, можуть використовуватися у більшості традиційних способів друку. Обрано крейдований (глянцевий та матовий папір), офсетний папір різної маси одного м. кв., дизайнерський металізований папір різного відтінку та плівки (біла та прозора) відомих виробників. Характеристики матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1  
Досліджувані матеріали

Матеріали	Характеристики	Виробник (постачальник)
Папір крейдований Arctic Paper	– Глянцевий: Досліджувані маси – 130, 200, 250, 300 г/м <sup>2</sup> – Матовий: Досліджувані маси – 130, 250, 350, 400 г/м <sup>2</sup> Пухкість – 1,13 Білизна (CIE) – 145 Яскравість (ISO 2470/D65 %) – 109 Шорсткість (Bendtsen, мл/хв.) – 150	– Arctic Paper (постачальник в Україні – Arctic Paper)
Папір офсетний UPM Fine	Досліджувані маси – 150, 170, 250 г/м <sup>2</sup> Пухкість – 1,14; 1,10; 1,10 відповідно Білизна (CIE) – 150 Яскравість – 103 Шорсткість – 230; 230; 250 відповідно	– UPM (постачальник в Україні – Сервісопторг, ТОВ)
Папір дизайнерський	– Cordenons Stardream splendor – Cordenons Stardream opal – Cordenons Stardream crystal Досліджувані маси – 280 г/м <sup>2</sup>	– Cordenons (постачальник в Україні – Август Трейд, ТОВ)
Самоклеючі плівки	– Ritrama RI – JET145 PVC GLOSS WHITE – Ritrama RI–145/165/205 Товщина – 80 мкм	– Ritrama (постачальник в Україні – Сервіс-центр Рітрама–Україна)

Дослідження проводилося шляхом вимірювання крайового кута змочування, зміни лінійних розмірів паперу при змочуванні та динамічного всотування (табл. 2).

Таблиця 2  
Показники та прилади для їх вимірювання

Показники	Прилади (марка, виробник)	Характеристики приладів
Крайовий кут змочування	Гоніометр версії PGX від компанії «Fibro Systems» (Швеція)	Вбудована камера: 80 зображень/сек. (640×480 пікселів). Вбудований насос – забезпечує точні краплі в кроках 0,5 мкл. Автоматичне додавання крапель – статичний і динамічний режим. Програмне забезпечення на основі

		32-бітних і 64-бітних операційних систем. Відповідає TAPPI T458, ASTM D-724, ASTM D-5946.
Лінійні розміри паперу	Аналізатор збільшення лінійних розмірів паперу при зволоженні Emtec WSD 02 (Німеччина)	Діапазон вимірювань: подовження до 25 %, при відсутності часових обмежень. Отримання даних: приблизно через 100 мс після контакту з рідиною. Мінімальні розміри зразка: 210×60 мм.
Динаміка проникнення води в структуру паперу	Аналізатор динамічного всотування Emtec PEA.C 02 (Німеччина)	Датчик: горизонтальна лінійка із 32 елементів 1×1 мм. Робоча частота: 1 МГц. Отримання даних: приблизно через 40 мс після контакту з рідиною. Тестові рідини: будь-які рідини низької і середньої в'язкості.

Взаємодія паперу з рідиною під час імпульсу тиску на поверхню задрукованого матеріалу відбувається за дуже короткий проміжок часу (мікросекунди/мілісекунди). Саме в цей момент відбувається формування характеристик майбутнього відбитка. Основний параметр поверхні, що визначає глибину проникнення рідини в структуру матеріалу: пористість. Зазвичай параметри друкарського оснащення встановлені для конкретного зразка задрукованого матеріалу. Застосування матеріалів з різною пористою структурою призводить до проблем при друкуванні. Адже встановлене в обладнанні дозування рідини може бути не коректним для багатьох різновидів субстратів. Саме тому застосування наведеного вище інструментального контролю є важливим при виборі технологічного процесу.

#### 4. 2. Методика проведення дослідження

Зразки задрукованих матеріалів було розрізано на смужки з розмірами  $a \times b$  ( $a$  – довжина, мм,  $b$  – ширина, мм), відповідно до технічних характеристик приладів (табл. 2).

Для вимірювання крайового кута змочування використовувався гоніометр версії PGX, який відповідає галузевим нормам Tappi T558 і ASTM D-5725 і вимогам ISO. Вбудована камера CCD реєструвала зображення краплі води, що аналізувалися програмним забезпеченням для ОС Windows'98/2000/XP. Для визначення статичного крайового кута застосовувалося 5 різних областей на кожному з досліджуваних задрукованих матеріалів. Для реєстрації геометричні параметри краплі (крайовий кут, діаметр контакту краплі з поверхнею, висота краплі) вимірювалися з частотою 10 разів за хвилину. Вибраний для ілюстрування час – 30 секунд. Початковий об'єм краплі – близько 2 мкл.

Для вивчення лінійних розмірів паперу при зволоженні застосовано аналізатор Emtec WSD 02. Аркуш задрукованого матеріалу поміщали в затискачі з навантаженням в 3,5 г. Зразок приводили в контакт з дистильованою водою у якості тестуючої рідини. Впродовж 60 с відбувалася реєстрація динамічного розтягування матеріалу при зволоженні дистильованою водою.

Для проведення дослідження також застосовано аналізатор динамічного всотування – Emtec PEA.C 02. Аркуш задрукованого матеріалу закріплювали на тримачі зразка приладу, після чого занурювали у тестову рідину. З моменту контакту з рідиною, джерело ультразвуку передавало високочастотні сигнали через зразок. При проникненні рідини в поверхню зразка змінювалася інтенсивність сигналу. Неоднорідне поглинання рідини на поверхні паперу модулювало передані сигнали різними способами. В результаті отримувалися 32 одинарні криві, що відображали виміряні відмінності на поверхні паперу/плівки. Кожна крива характеризувала середню структуру пор, визначену для площі сенсорного елемента 1×1 мм. Аналіз отриманих кривих дозволив визначити динаміку проникнення води в структуру паперу та оцінити друкарсько-технічні властивості матеріалу.

## **5. Результати досліджень основних показників при взаємодії системи «матеріал – рідина»**

### **5. 1. Визначення крайового кута змочування залежно від виду задрукованого матеріалу**

При проведенні дослідження, камерою зафіксовані зображення краплин, нанесених на поверхню задрукованих матеріалів. При вимірюванні крайового кута змочування спостерігалися явища швидшого всотування краплі у пористу структуру паперу для офсетного способу друку (рис. 1) впродовж заданого часового проміжку. Натомість, дизайнерські матеріали, плівки, крейдований папір (рис. 2, *а–в*) не мали подібної динаміки, що є зрозумілим та спричинено структурними властивостями досліджуваних матеріалів.

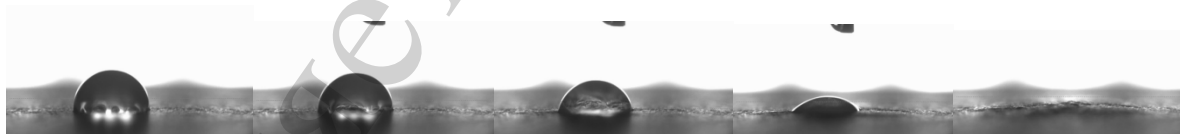


Рис. 1. Зафіксоване камерою зображення краплі, нанесеної на поверхню офсетного паперу, 170 г/м<sup>2</sup>

На рис. 3, *а, б* та рис. 4, *а, б* графічно відображено кінетику зміни крайового кута змочування дистильованою водою при дослідженні різних матеріалів. На рис. 5 наведено крайовий кут змочування зразків на 30-й секунді проведення експерименту.

Динаміка зміни крайових кутів змочування на поверхні зразків паперу з різним покриттям дозволяє оцінити їх здатність сприймати водні чорнила струменевого принтера (змочування, розтікання). Досліджувані глянцеві папери (рис. 3, *а*) мають поверхневий натяг в перерахунку в одиниці дин/см в діапазо-

ні – 44–46. Натомість матові крейдовані папери (рис. 3, б) мають ширший діапазон, 35–46 дин/см. Проте, всі зразки при друкуванні струминним способом мають допустимий діапазон та мають забезпечити додатні колірні показники відбитків.

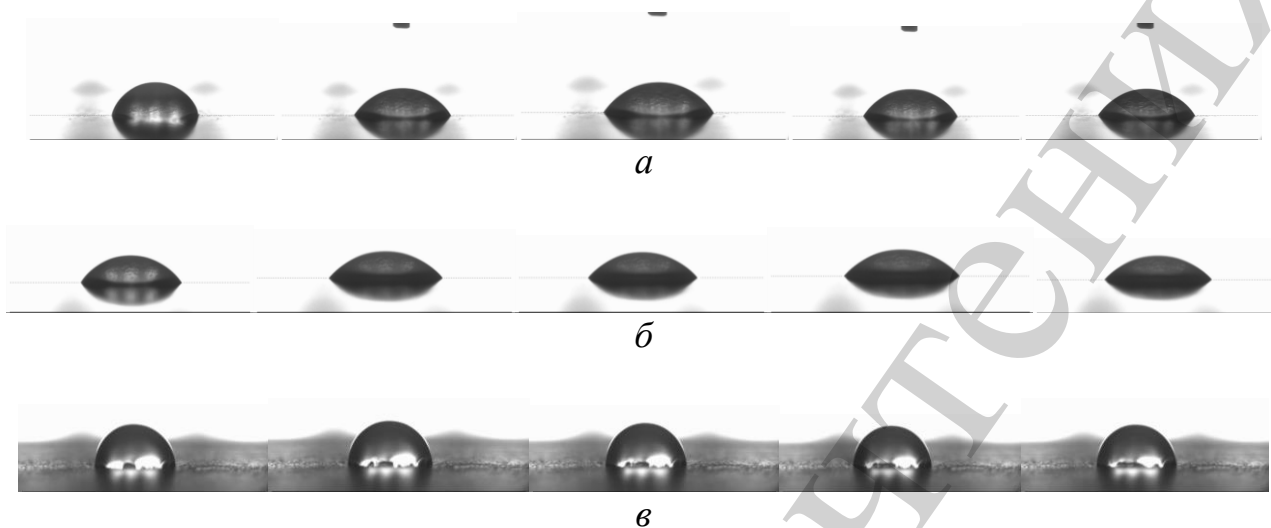
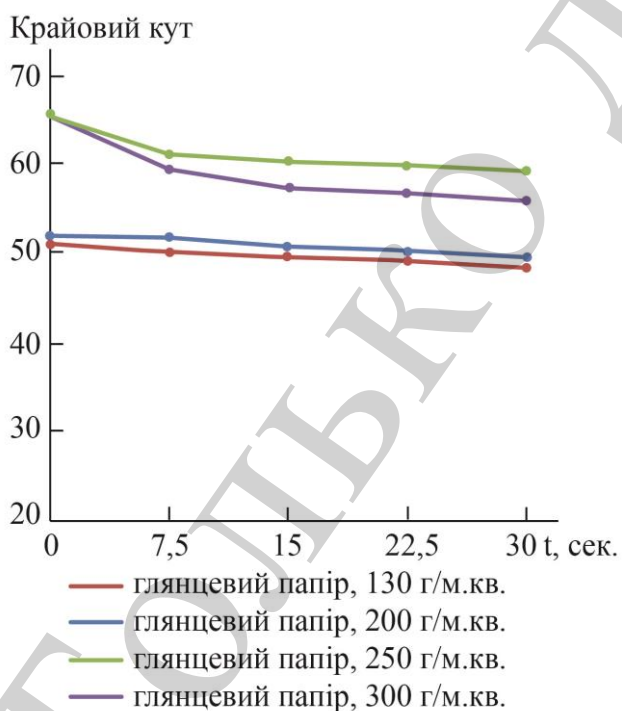
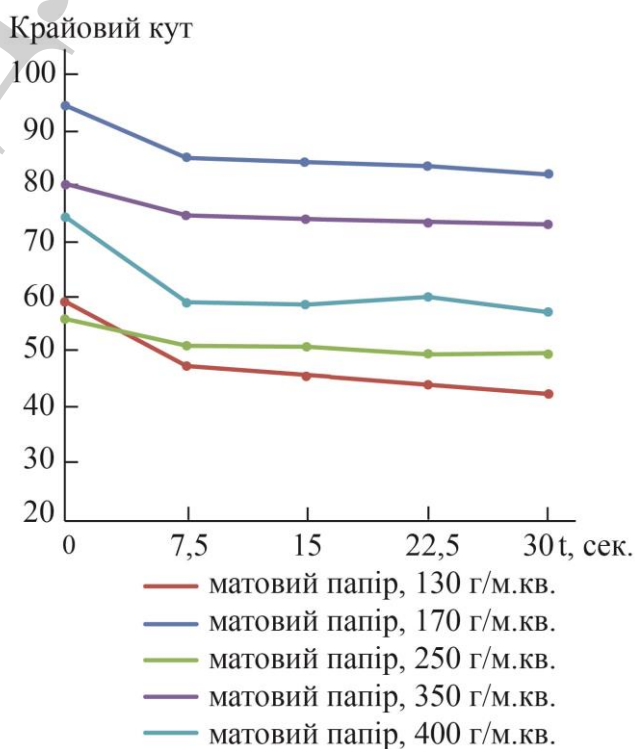


Рис. 2. Зафіксоване камерою зображення краплі, нанесеної на поверхню: *a* – матового крейдованого паперу, 400 г/м<sup>2</sup>; *б* – глянцевого крейдованого паперу, 130 г/м<sup>2</sup>; *в* – дизайнерського паперу № 3, Cordenons Stardream crystal, 280 г/м<sup>2</sup>



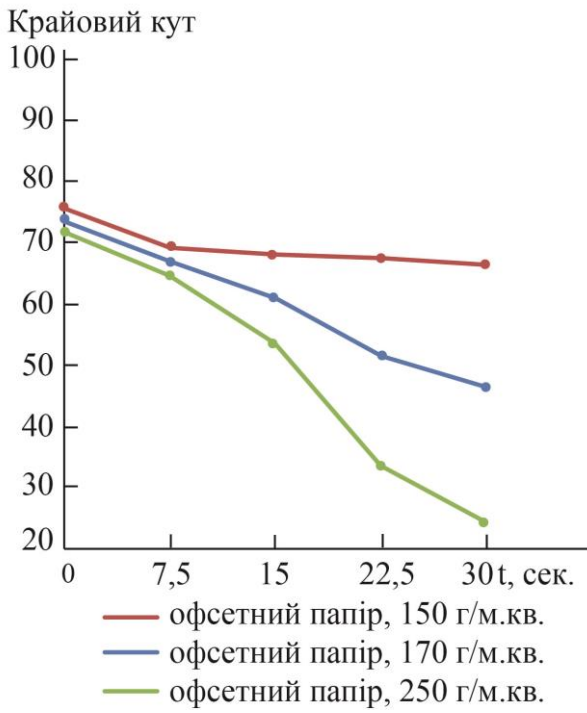
*a*



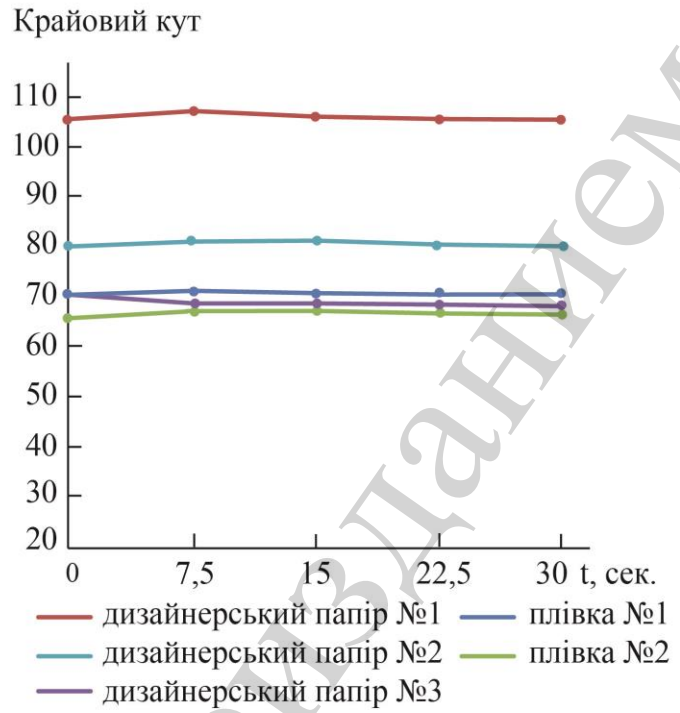
*б*

Рис. 3. Кінетика зміни крайового кута змочування дистильованою водою при дослідженні: *a* – глянцевого паперу; *б* – матового паперу





*a*



*б*

Рис. 4. Кінетика зміни крайового кута змочування дистильованою водою при дослідженні: *a* – офсетного паперу; *б* – дизайнерського паперу та плівки

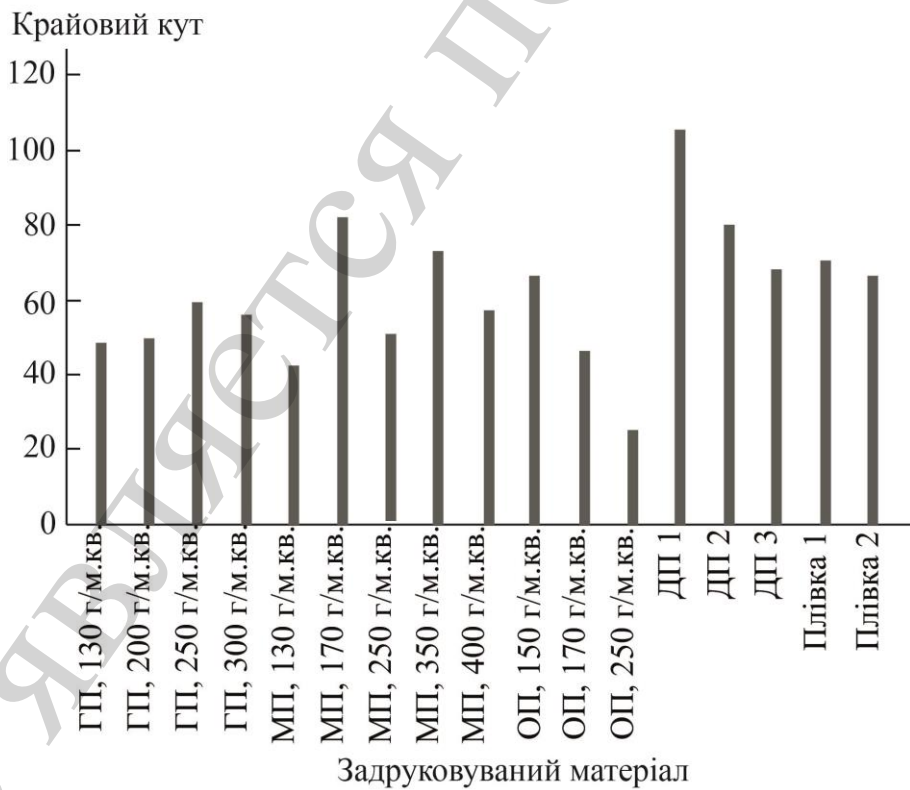
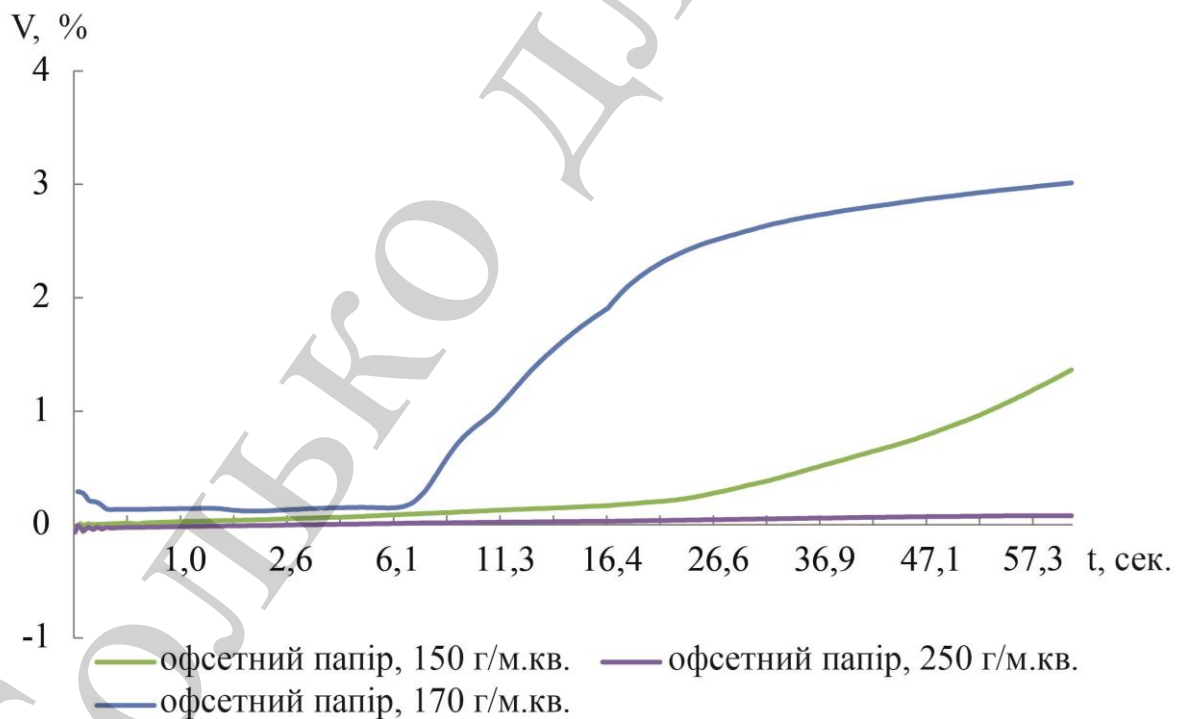


Рис. 5. Крайовий кут змочування зразків на 30-й секунді проведення експерименту

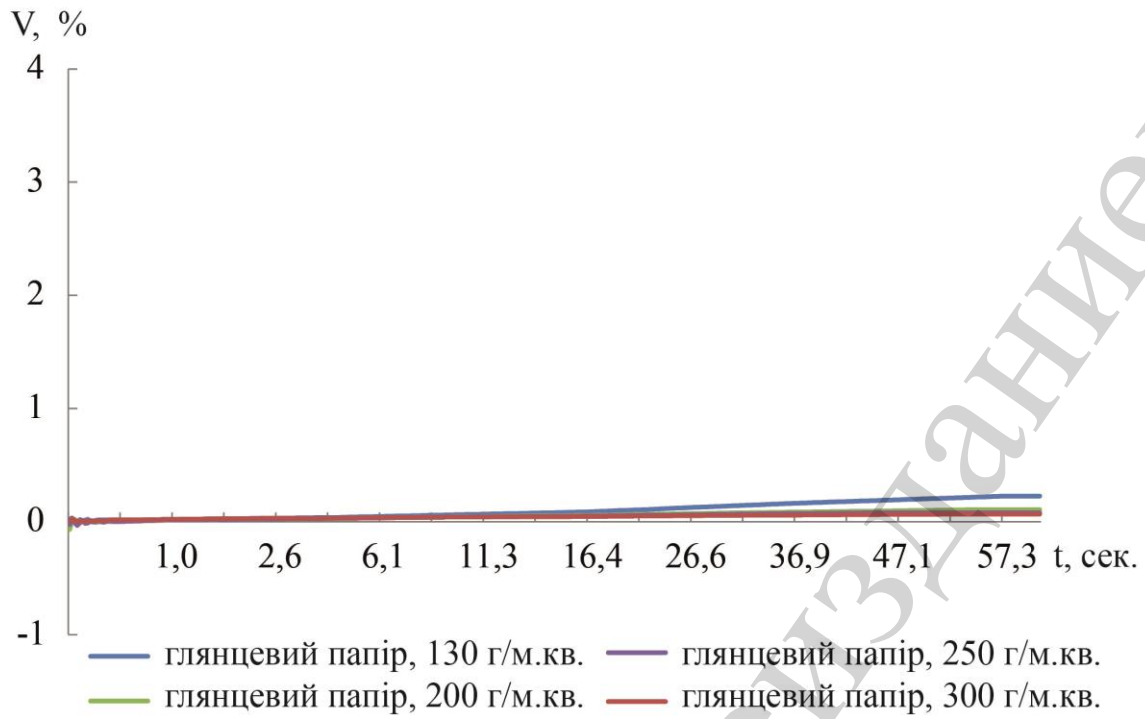
Проаналізувавши дані експериментальних досліджень, можна стверджувати, що поверхневі властивості дослідних задруковуваних матеріалів залежать від складу та концентрації добавок у них. З рис. 3–5 видно, що вода краще змочує і розтікається по поверхні зразків паперу офсетного (рис. 4, *а*) та крейдованого матового (рис. 3, *б*). Для досягнення адгезії друкарських фарб необхідно, щоб поверхневий натяг невсотувального задрукованого матеріалу був не менше 38 дин/см. Це значення є мінімально необхідним, і як показує практика 40–42 дин/см, в деяких випадках більше застосовується. Досліджувані плівки (рис. 4, *б*) мають поверхневу обробку з поверхневим натягом 40–41 дин/см та відразу можуть використовуватися при отриманні репродукцій. Проте високі значення крайового кута та практично лінійна залежність в динаміці для плівок може викликати проблеми із закріплення саме чорнил на відбитку. Натомість, дизайнерський папір 1 та 3 взагалі є не придатними для задруковування чорнилами для струминного друку, оскільки можливі погіршення закріплення фарби на відбитках, як наслідок, якості відбитків, що можна пояснити наявністю металізованих частинок.

## 5. 2. Визначення лінійних розмірів при зволоженні зразків тестовою рідиною

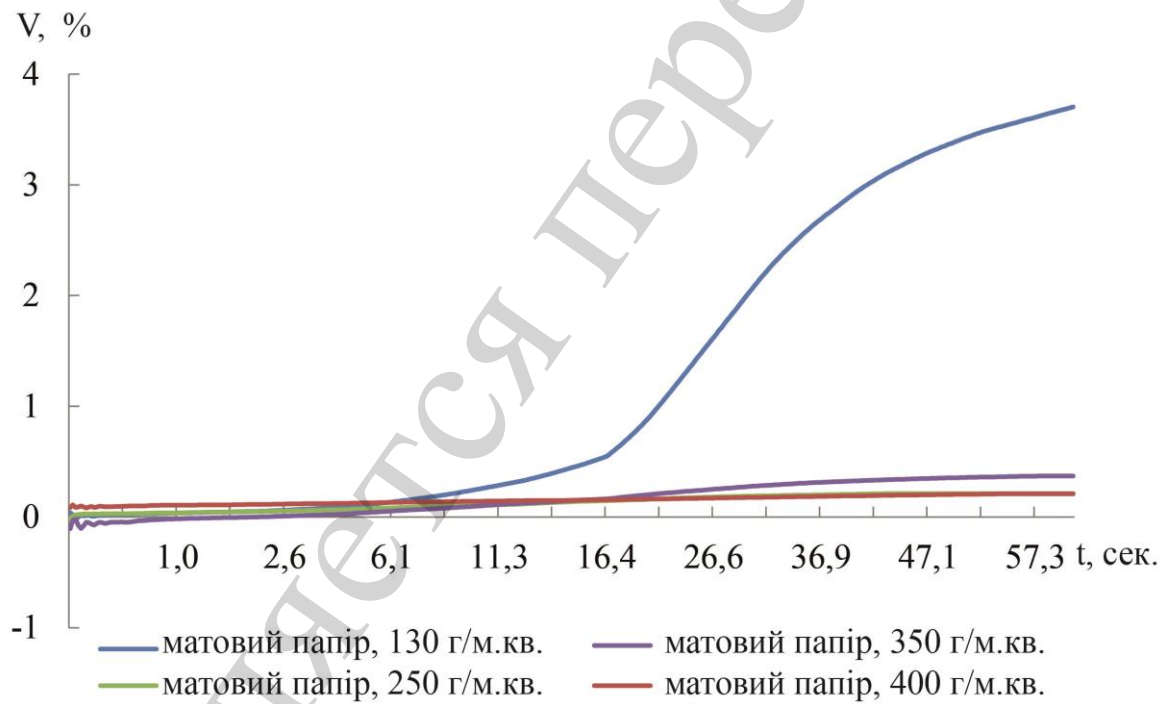
За результатами аналізу лінійних розмірів паперу при зволоженні на приладі Emtec WSD 02, динамічному розтягуванню піддаються зразки тонких та більш пористих без покриття паперів (рис. 6, *а*, *в*).



*а*

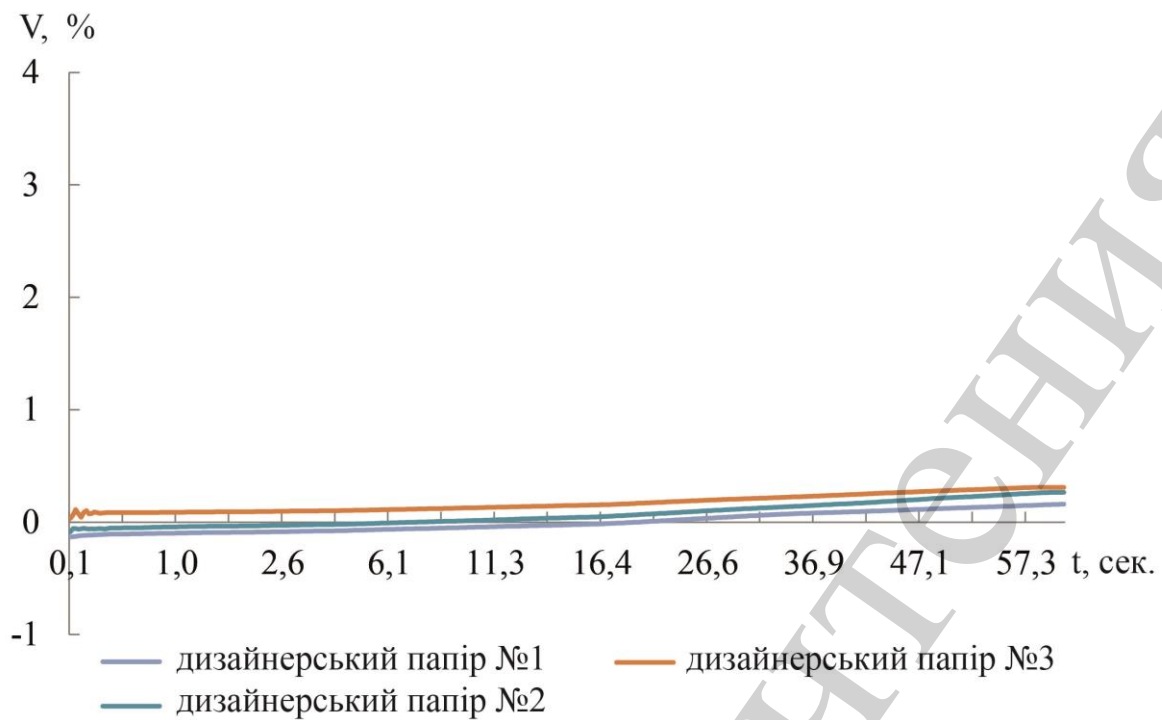


б



в

Не являється перевіреним



г

Рис. 6. Динамічне розтягування при зволоженні дистильованою водою: а – офсетного; б – крейдованого глянцевого; в – крейдованого матового; г – дизайнерського паперу (закінчення)

### 5. 3. Визначення динаміки проникнення води в структуру зразків

На рис. 7 наведено результати вимірювання динаміки всотування впродовж перших 20 сек. для чотирьох типів (крейдований, офсетний та дизайнерський металізований папери та плівка біла) задруковуваних матеріалів. Плівка є стабільно стійкою до всотування рідини та не придатна до задруковуванні рідкими чорнилами без попередньої обробки. Проблеми при друкуванні струминним способом також можуть виникнути при використанні дизайнерського паперу.

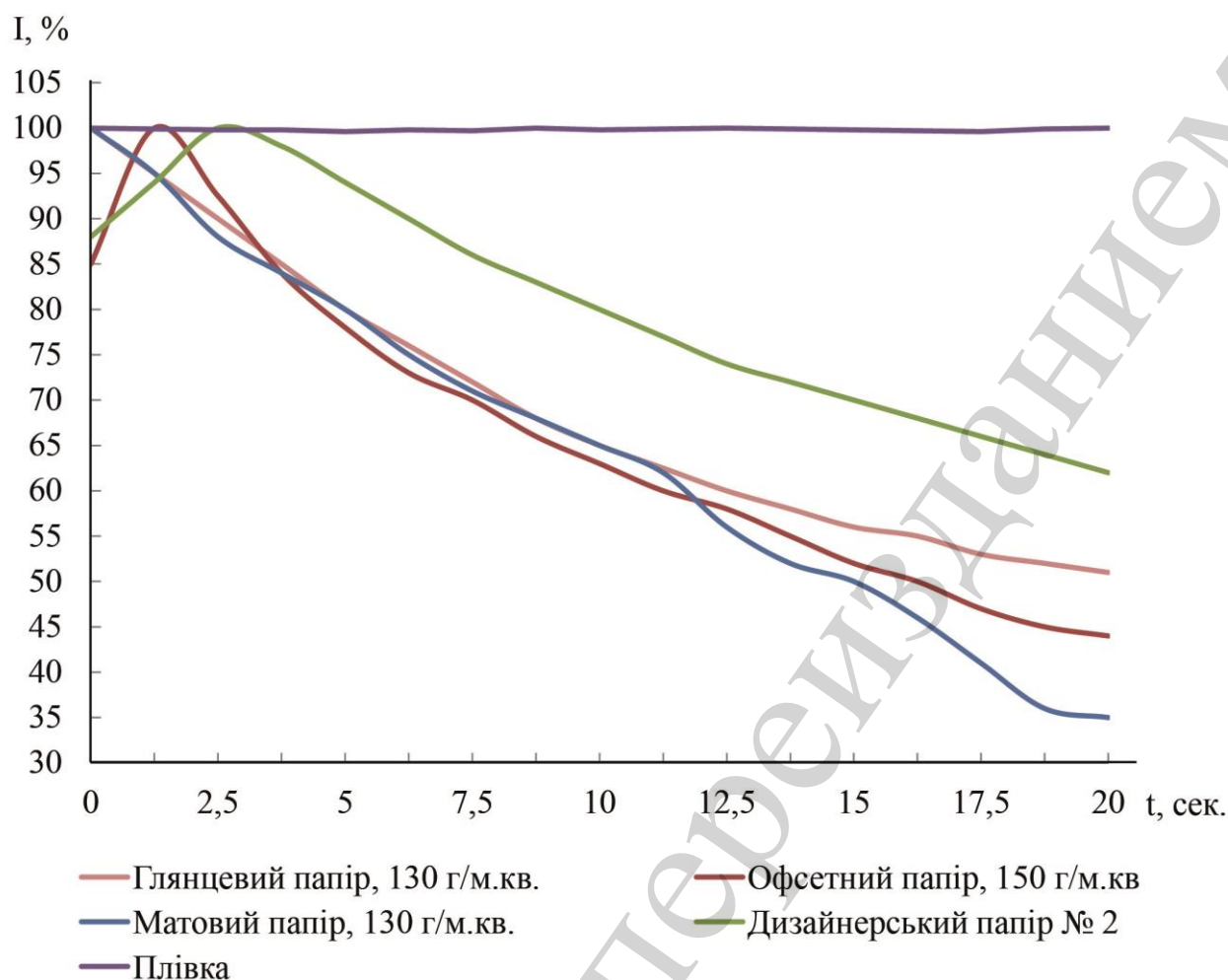


Рис. 7. Графічні залежності з приладу РЕА

Як видно з рис. 7, найбільший опір проникненню води створює дизайнерський папір (найбільший час  $T_{\max}=2,36-4,88$ ), а після нього папір офсетний (час  $T_{\max}=0,19-2,28$ ). Крейдовані папери характеризуються нульовою фазою зволоження ( $W=0$ ) і відразу після занурення до води настає їх максимальне просочування. Дизайнерські матеріали характеризуються низькою проникністю рідини у товщу, що може призвести до поганого закріплення чорнила на відбитку.

Найважливіші властивості задруковуваних матеріалів, що перевіряються перед друком, результати вимірювань з РЕА та WSD наведені в таблиці 3. Густина чорнила для струминного друку знаходиться в хорошій кореляції з комбінацією вимірювань: визначено показник пористості по точці (T95), ( $T_{\max}$ ) та об'єм поверхні паперу ( $W$ ). Координати CIE Lab практично для всіх зразків, окрім дизайнерських, знаходяться в допустимих межах згідно ДСТУ ISO 12647-2, відповідно, вплив підкладки на колірні характеристики відбитка буде мінімальним, проте різниця у всотувальній здатності може призвести до спотворення і відмінностей кольору на різних типах матеріалів.

Таблиця 3

Результати вимірювання основних показників задруковуваних матеріалів

Тип ЗМ	Маса, г/м <sup>2</sup>	Змочування поверхні паперу, $T_{95}, s$	Поверхневий об'єм води, $W$	$T_{max}, c$
1. Папір крейдований глянцевиий				
№ 1	130	1,43	0,00	0,08
№ 2	200	1,18	0,00	0,08
№ 3	250	1,55	0,00	0,08
№ 4	300	3,56	0,00	0,08
2. Папір крейдований, матовий				
№ 1	130	1,43	0,00	0,08
№ 2	170	1,18	0,00	0,08
№ 3	250	1,77	0,00	0,08
№ 4	350	3,82	0,00	0,08
№ 5	400	3,61	0,00	0,08
3. Папір офсетний				
№ 1	150	0,99	0,16	2,28
№ 2	170	0,58	0,03	0,19
№ 3	250	0,66	0,04	0,19
4. Папір дизайнерський				
№ 1	280	1,06	0,32	2,36
№ 2	280	4,69	6,13	3,01
№ 3	280	11,37	21,4	4,88

Як видно з табл. 3 та частково з рис. 7, за показником  $T_{95}$  низьку проклейку в масі та найбільшу пористість мають офсетні папери. Відповідно, дані зразки є найбільш придатними з усіх досліджуваних для задруковування струминним способом. Прийнятні колірні показники можуть забезпечити також тонкі крейдовані папери (до 250 г/м<sup>2</sup>) та дизайнерський без металізованих частинок. Усі інші зразки погано піддаються зволоженню рідинами та є проблемними при задруковуванні струминним способом.

### 6. Математичне опрацювання результатів дослідження

Слід провести перевірку висунутих гіпотез на відповідність математико-статистичним твердженням достовірності, а саме: розрахунок величин кореляції та встановлення кореляційних зв'язків.

Дослідимо залежність найбільшого опору проникнення води  $T_{max}$  від показника пористості по точці ( $T_{95}$ ) і поверхневим об'ємом води  $W$ . Відповідно, позначимо ці величини, як  $Z$ ,  $X$  та  $Y$ . Оберемо для дослідження 6 типів паперу: 3 типи офсетного та 3 типи дизайнерського (за номерами 1, 2 та 3), результати вимірювання для яких надано у табл. 3. Як відомо [20], у випадку, коли досліджуваний об'єкт або явище характеризується більш ніж двома ознаками  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , потрібно вивчати множинні залежності. Для оцінки сили зв'язку

між певною ознакою  $X_i$  та усіма іншими ознаками слугує *множинний коефіцієнт кореляції*, який позначається  $R_j$ . Також, у випадку, коли необхідно дослідити кореляційний зв'язок між ознаками  $X_i$  та  $X_j$ ,  $i=1, \dots, k$ ,  $j=1, \dots, k$ , із множини ознак  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , досліджуваного об'єкту або явища, вільного від впливу всіх інших ознак, розраховується *частинний коефіцієнт кореляції*, який позначається  $R_{ij}$ .

Вважається, що для коректного використання множинного і частинного коефіцієнтів кореляції необхідно, щоб вибіркові дані мали сумісний нормальний розподіл, однак перевірка цієї умови на практиці зазвичай не виконується, оскільки пов'язана зі значними труднощами у розрахунках.

Визначимо силу зв'язку між  $Z$  та  $X$  та  $Y$ , використовуючи множинний коефіцієнт кореляції, також порівняємо силу зв'язку між  $Z$  та  $X$  та між  $Z$  та  $Y$  за частинними коефіцієнтами кореляції.

З математичної точки зору, за умовою поставленої задачі, потрібно для об'єкту, що характеризується трьома ознаками  $X, Y$  та  $Z$  ( $k=3$ ), розрахувати [20] множинний коефіцієнт кореляції  $R_Z$  і частинні коефіцієнти кореляції  $R_{XZ}$  та  $R_{YZ}$  на основі 6 взаємопов'язаних трійок вибірових даних  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ,  $n=6$ .

Побудуємо матрицю парних коефіцієнтів кореляції  $r_{ij}$ ,  $i=1, \dots, k$  між ознаками  $X_i$  та  $X_j$  вигляду:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{kk} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

У випадку незгрупованих даних  $r_{ij}$ ,  $i=1, \dots, k$  ( $r_{ij}=r_{ji}$ ) обчислюють за формулою

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}. \quad (2)$$

Розрахунки занесені до табл. 4.

Таблиця 4  
Розрахункова таблиця коефіцієнтів кореляції

Розраховані значення коефіцієнтів кореляції							$\Sigma$
$x_i$	0,99	0,58	0,66	1,06	4,69	11,37	19,35
$y_i$	0,16	0,03	0,04	0,32	6,13	21,4	28,08
$z_i$	2,28	0,19	0,19	2,36	3,01	4,88	12,91
$x_i^2$	0,9801	0,3364	0,4356	1,1236	21,9961	129,2769	154,1487
$y_i^2$	0,0256	0,0009	0,0016	0,1024	37,5769	457,96	495,6674

$z_i^2$	5,1984	0,0361	0,0361	5,5696	9,0601	23,8144	43,7174
$x_i y_i$	0,1584	0,0174	0,0264	0,3392	28,7497	243,318	272,6091
$x_i z_i$	2,2572	0,1102	0,1254	2,5016	14,1169	55,4856	74,5969
$y_i z_i$	0,3648	0,0057	0,0076	0,7552	18,4513	104,432	124,0166

Отже, за формулою (2) маємо:

$$r_{XY} = r_{YX} = \frac{6 \cdot 272,6091 - 19,35 \cdot 28,08}{\sqrt{6 \cdot 154,1487 - 19,35^2} \sqrt{6 \cdot 495,6674 - 28,08^2}} \approx 0,9959.$$

Аналогічно, для  $r_{XZ}=r_{ZX}$  та  $r_{YZ}=r_{ZY}$ , маємо:

$$r_{XZ} = r_{ZX} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i z_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n z_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n z_i \right)^2}} \approx 0,862;$$

$$r_{YZ} = r_{ZY} = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i z_i - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \left( \sum_{i=1}^n z_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n z_i \right)^2}} \approx 0,8347.$$

Таким чином, кореляційна матриця має вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0,9959 & 0,862 \\ 0,9959 & 1 & 0,8347 \\ 0,862 & 0,8347 & 1 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо визначник  $|A|$  матриці  $A$  (з використанням засобів Microsoft Excel) та алгебраїчне доповнення  $A_{zz}=A_{33}$ .

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 0,9959 & 0,862 \\ 0,9959 & 1 & 0,8347 \\ 0,862 & 0,8347 & 1 \end{vmatrix} = 0,0156;$$



$$A_{ZZ} = A_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 0,9959 \\ 0,9959 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= 1 - 0,9959^2 \approx 0,0083.$$

Тоді за відомою [18] формулою:

$$R_Z = R_3 = \sqrt{1 - \frac{|A|}{A_{33}}} = \sqrt{1 - \frac{0,0156}{0,0083}} \approx 0,9008.$$

Значення множинного коефіцієнта кореляції  $R_Z$  показує, що величина  $Z$  сильно пов'язана з  $X$  та  $Y$ .

Перевіримо статистичну значущість множинного коефіцієнта кореляції  $R_Z$ . Знайдемо  $t$ -статистику за формулою:

$$t = \frac{R^2(n-k)}{(1-R^2)(k-1)} = \frac{0,9008^2(6-3)}{(1-0,9008^2)(3-1)} \approx 6,45.$$

Розраховане значення  $t$ -статистики порівнюється з критичним значенням  $F_{\text{крит}}$ .  $F_{\text{крит}}$  – табличне значення розподілу Фішера (за додатком-таблицею значень) [20], яке також можна знайти за допомогою вбудованої статистичної функції Excel ФРАСПОБР ( $\alpha$ ;  $l_1$ ;  $l_2$ ), де  $\alpha$  – обраний дослідником рівень значущості (зазвичай обирають для  $\alpha$  значення 0,01; 0,05; 0,1),  $l_1$ ;  $l_2$  – степені вільності,  $l_1=k-1$ ;  $l_2=n-k$ .

Знайдемо  $F_{\text{крит}}$ , враховуючи, що  $l_1=k-1=3-1=2$ ,  $l_2=n-k=6-3=3$ . Оберемо рівень значущості  $\alpha=0,085$ . Тоді  $F_{\text{крит}}=\text{ФРАСПОБР}(0,085; 2; 3)=6,259$ . Оскільки  $t > F_{\text{крит}}$ , то нульова гіпотеза про відсутність кореляції відхиляється, множинний коефіцієнт кореляції  $R_Z$  є статистично значимим на обраному рівні значущості (тенденція достовірного зв'язку).

Для розрахунку частинного коефіцієнта кореляції потрібно: побудувати матрицю парних коефіцієнтів кореляції  $A$ ; знайти алгебраїчні доповнення  $A_{ii}$ ,  $A_{jj}$ ,  $A_{ij}$  елементів  $r_{ii}$ ,  $r_{jj}$ ,  $r_{ij}$ , відповідно; обчислити частинний коефіцієнт кореляції [20] за формулою:

$$R_{ij} = \frac{-A_{ij}}{\sqrt{A_{ii}A_{jj}}}. \quad (3)$$

Перевірка статистичної значущості частинного коефіцієнта кореляції здійснюється за допомогою  $t$ -статистики, яка розраховується за формулою:

$$t = \frac{R_{ij} \sqrt{n-k+2}}{\sqrt{1-R_{ij}^2}}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість взаємопов'язаних значень ознак  $X_i$ ,  $i=1, \dots, k$ .

Розраховане значення  $t$ -статистики порівнюється з критичним значенням  $t_{\text{крит}}$ .  $t_{\text{крит}}$  – табличне значення розподілу Стьюдента, яке також можна знайти за допомогою вбудованої статистичної функції Excel СТЬЮДРАСПОБР ( $\alpha$ ;  $l$ ), де  $\alpha$  – обраний дослідником рівень значущості,  $l$  – степені вільності,  $l=n-k+2$ .

Якщо розраховане значення  $t$ -статистики більше критичного  $|t| > t_{\text{крит}}$ , то частинний коефіцієнт кореляції вважається значимим на обраному рівні значущості  $\alpha$ .

Для обчислення частинних коефіцієнтів кореляції  $R_{XZ}=R_{13}$  та  $R_{YZ}=R_{23}$  знайдемо потрібні алгебраїчні доповнення:  $A_{13} \approx -0,0308$ ;  $A_{23} \approx 0,0238$ ;  $A_{11} \approx 0,3032$ ;  $A_{22} \approx 0,2569$ .

Тоді за формулою (3) маємо:

$$R_{13} = \frac{-A_{13}}{\sqrt{A_{11}A_{33}}} = \frac{-(-0,0308)}{\sqrt{0,3032 \cdot 0,008}} \approx 0,615;$$

$$R_{23} = \frac{-A_{23}}{\sqrt{A_{22}A_{33}}} = \frac{-0,0238}{\sqrt{0,2569 \cdot 0,008}} \approx -0,5158.$$

Значення частинних коефіцієнтів кореляції показують, що величина  $Z$  пов'язана з величиною  $X$  сильніше, ніж з величиною  $Y$ .

Перевірка статистичної значущості,  $t$ -статистики за формулою (4) дає:

$$t_1 = \frac{R_{13} \sqrt{n-k+2}}{\sqrt{1-R_{13}^2}} = \frac{0,615 \cdot \sqrt{6-3+2}}{\sqrt{1-0,615^2}} \approx 1,744; \quad t_2 \approx -1,346.$$

Знайдемо критичне значення  $t_{\text{крит}}$ , оберемо рівні значущості  $\alpha=0,05$  та  $\alpha=0,01$ . Тоді  $t_{\text{крит}} = \text{СТЮДРАСПОБР}(0,05; 5) = 2,57$  і, відповідно,  $t_{\text{крит}} = \text{СТЮДРАСПОБР}(0,01; 5) = 4,03$ . Оскільки розраховані значення  $t$ -статистики для  $R_{13}$  та  $R_{23}$  менші критичного  $|t| < t_{\text{крит}}$ , то частинні коефіцієнти кореляції не є значимими на обраних рівнях значущості. Однак, для  $\alpha=0,25$   $t_{\text{крит}} = \text{СТЮДРАСПОБР}(0,25; 5) = 1,3$ ,  $|t| > t_{\text{крит}}$ , то частинні коефіцієнти кореляції  $R_{13}$  та  $R_{23}$  є значимими на рівні значущості  $\alpha=0,25$ , причому наявна незначима кореляція.

Розрахунки величин кореляції та встановлення кореляційних зв'язків підтвердили експериментальну залежність показника  $T_{\text{max}}$  від показника  $T_{95}$ . Опір проникнення води також має взаємозв'язок з показником  $W$ , хоча і в меншому ступені. Всі сили зв'язку,  $t$ -статистики, є статистично значимими при

відповідному виборі рівня значущості. Отже, змочування поверхні паперу має обов'язково досліджуватися перед введенням в виробничий процес різних типів задруковуваних матеріалів. Це дозволить прийняти вірне рішення в процесі вибору системи «задруковуваний матеріал – відбиток». Адже поверхнева проклейка матеріалу, проклейка в масі, або невсотувальна поверхня пілівок можуть чинити опір проникненню води та впливати на якість відбитків.

## **7. Обговорення результатів дослідження взаємодії задруковуваних матеріалів з рідинами**

Отримані результати дослідження можна використовувати при виборі раціонального технологічного процесу у друкарнях, а методику тестування при створенні нових зразків задруковуваних матеріалів на папероробних фабриках.

Запропонована методика тестування витратних матеріалів дозволяє уникнути помилок при виборі системи «задруковуваний матеріал – відбиток» та зменшити кількість браку. Перед їх використанням у технологічному процесі виготовлення поліграфічної продукції варто визначати ступінь змочування поверхні рідиною, особливо при застосуванні принципово нових матеріалів для друку. Визначення показника змочування поверхні матеріалу дає змогу встановити його придатність до використання у струминному чи офсетному способі, де спостерігається найбільша ступінь взаємодії зразків з рідинами. У разі значної лінійної деформації, якісний відбиток можна буде отримати іншими способами, трафаретним, електрофотографією тощо. Визначення крайового кута змочування дає можливість визначити адгезію фарби до субстрату та прийняти рішення щодо використання рідинних чи тоннерних систем у процесі виготовлення відбитків.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення взаємодії задруковуваних матеріалів не з тестовою рідиною, а реальною, що використовується у технологічному процесі виготовлення поліграфічної продукції. Так, крейдовані та офсетні папери можна застосовувати не лише в офсетному способі друку, де відбувається контакт субстрату зі зволожувальним розчином і матеріал піддається лінійній деформації. Дані матеріали можна задруковувати і струминним способом, де у якості фарбувальної речовини використовується рідке чорнило, схоже за своїми властивостями на тестову рідину. Дизайнерські папери та плівки є прекрасним матеріалом для отримання ексклюзивної продукції, отриманої цифровим способом, або класичними способами із використанням УФ-фарб. При цьому вони придатні і для офсетного способу, а взаємодія зі зволожувальним розчином не призведе до небажаної лінійної деформації та спотворення колірних характеристик відбитків. Проте за результатами дослідження задруковування струминним способом даних матеріалів не забезпечить отримання якісних репродукцій і призведе до ускладнень процесу закріплення.

## **8. Висновки**

1. Запропоновано методику тестування витратних матеріалів для раціонального вибору технологічного процесу їх задруковування. Зокрема,

визначення всотувальної здатності, лінійної деформації, крайового кута перед процесом їх експлуатації призведе до правильного вибору системи «задруковуваний матеріал – відбиток» та зменшить кількість бракованих зразків продукції.

2. Визначення лінійних розмірів паперу при зволоженні зразків дистильованою водою підтвердило, що динамічному розтягуванню більше піддаються зразки тонких та пористих без покриття паперів. Тому варто ретельно контролювати кількість подачі рідини у технологічному процесі виготовлення продукції задля уникнення лінійної деформації матеріалу та спотворення репродукцій;

3. Можна констатувати, що крейдовані та офсетні папери можуть бути використані для отримання репродукцій струминним способом. Застосування дизайнерських паперів та плівок може ускладнити процес закріплення чорнила на відбитку та отримання якісних репродукцій. Визначення динаміки проникнення води в структуру паперу засвідчили, що зазначені матеріали варто обирати для задруковування тонером, УФ- або фолієвими фарбами залежно від характеру продукції та накладу;

4. Висловлені гіпотези щодо взаємодії різних типів задруковуваних матеріалів з рідинами перевірено за допомогою розрахунку величин кореляції та встановлення кореляційних зв'язків. Підтверджено, що найбільший опір проникнення води  $T_{\max}$  сильно залежить від показника пористості по точці ( $T_{95}$ ) і поверхневого об'єму води. При цьому значно сильніше залежить від змочування поверхні паперу, ніж від виміряного поверхневого об'єму води.

## Література

1. Кушлик Б. Р., Кушлик-Дивульська О. І. Стабілізація друкування малотиражної продукції офсетним друком: монографія / ред. О. М. Величко. Київ: Вид-во «Політехніка», 2017. 162 с.
2. Khadzhynova S., Jakucewicz S. Sposoby drukowania cyfrowego: monografie. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2016. 242 p.
3. Aslannejad H., Hassanizadeh S. M. Study of Hydraulic Properties of Uncoated Paper: Image Analysis and Pore-Scale Modeling // Transport in Porous Media. 2017. Vol. 120, Issue 1. P. 67–81. doi: <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0909-x>
4. Зоренко Я. В. Технології репродукування плоским офсетним друком: монографія / ред. О. М. Величко. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2015. 176 с.
5. Rosenholm J. B. Liquid spreading on solid surfaces and penetration into porous matrices: Coated and uncoated papers // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 220. P. 8–53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.01.009>
6. Величко О. М., Гавенко С. Ф., Золотухіна К. І. Матеріали зі спеціальними властивостями: навч. пос. Львів, 2016. 155 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18093>

7. Гринчук С. С., Снігур Н. С., Ярка Н. В. Вплив фізико-хімічної обробки поліпропіленових плівок на їх змочуваність // Наукові записки. 2008. № 1. С. 112–117. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz\\_2008\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_2008_1_18)
8. Velychko O., Zolotukhina K., Rozum T. The improvement of dampening solution for offset printing // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 6 (82). P. 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74981>
9. Rossitza S. Offset Printing without Isopropyl Alcohol in Dampening Solution // Energy Procedia. 2015. Vol. 74. P. 690–698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.804>
10. Могинов Р. Г., Амосов Р. М., Затула О. Ю. Экспериментальная проверка влияния шероховатости запечатываемого материала на равномерность оттиска // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2011. № 4. С. 44–52.
11. Коротка В. О., Зацерковна Р. С. Дослідження адгезійних властивостей оксо-біорозкладальних плівок при отриманні відбитків трафаретного друку // Квалілогія книги. 2014. № 1. С. 28–32. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kk\\_2014\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kk_2014_1_8)
12. The Papers Printing Quality Complex Assessment Algorithm Development Taking into Account the Composition and Production Technological Features / Babakhanova K. A., Varepo L. G., Nagornova I. V., Babluyk E. B., Kondratov A. P. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 998. P. 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/998/1/012003>
13. Варєпа Л. Г., Чиликіна Г. С., Наумов В. А. Кинетика впитывания уайт-спирита различными видами бумаги. Сообщение 4. Показатели шероховатости образцов бумаги и картона // Известия вузов. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2008. № 1. С. 56–61.
14. Гілета І. В., Гавенко М. М., Сеньківський В. М. Модель факторів впливу на процес проектування тактильної продукції // Поліграфія і видавнича справа. 2017. № 1 (73). С. 87–96. URL: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-73/12.pdf>
15. Kryczka M., Khadzhynova S., Skowroński J. Wpływ właściwości papieru na jakość druków cyfrowych. Część 2 // Przegląd Papierniczy. 2011. Vol. 67, Issue 10. P. 611–615.
16. Gigac J., Stankovská M., Pazitny A. Influence of the coating formulations and base papers on inkjet printability // Wood research. 2016. Vol. 61, Issue 6. P. 915–926.
17. Ataefard M. Influence of paper surface characteristics on digital printing quality // Surface Engineering. 2014. Vol. 30, Issue 7. P. 529–234. doi: <https://doi.org/10.1179/1743294414y.0000000264>
18. Limitations of Current Formulations when Decreasing the Coating Layer Thickness of Papers for Inkjet Printing / Lamminmäki T., Kettle J., Rautkoski H., Kokko A., Gane P. // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50, Issue 12. P. 7251–7263. doi: <https://doi.org/10.1021/ie102114s>
19. Research on the Penetration and Diffusing Dynamics of Inkjet Droplet in Paper Coating / Chen Q. F., Chen G. X., Tang B. L., Tai J. L. // Applied Mechanics

and Materials. 2012. Vol. 200. P. 446–450. doi: [https://doi.org/10.4028/  
www.scientific.net/amm.200.446](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.200.446)

20. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. пос. / Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П., Штабальок П. І. Київ, 2014. 212 с.

Т О Л Ь К О   Д Л Я   Ч Т Е Н Н Я