

УДК 613:676.252.334-035.41

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156534

## Створення модернізованих фільтрувальних паперових матеріалів для очистки води та оцінка їх властивостей

К. Ю. Загороднюк, В. Г. Войцеховський, О. М. Коробочка,  
А. М. Гринзовський, В. С. Авер'янов

Для очистки води широкого застосування знайшли матеріали паперові фільтрувальні (МПФ), які легко піддаються утилізації. Основним недоліком абсолютної більшості фільтрувальних матеріалів, в тому числі і паперових, є їх схильність до біообростання. Даний недолік суттєво обмежує чи інколи навіть унеможливорює використання фільтрувальних матеріалів та/чи сорбентів у певній сфері. У зв'язку з вищевикладеним, об'єктом даного дослідження став процес очистки води з використанням МПФ із незаражуючими властивостями на основі модифікованих целюлозних волокон та природного сорбенту палигорскіт, які можуть сорбувати механічні домішки, іони важких металів, ентеровіруси та бактерії.

Встановлено, що зразки модифікованих матеріалів паперових фільтрувальних із найвищою щільністю та найменшою товщиною та зразки із найменшою щільністю та найбільшою товщиною мають більшу фільтраційну та сорбційну здатності у порівнянні із зразками з середніми значеннями цих технологічних параметрів.

Набухання целюлозних волокон зменшує силу впливу композиційного складу досліджених зразків МПФ на їх фільтраційну здатність та збільшує силу впливу композиційного складу на сорбційну здатність цих МПФ.

Встановлено, що найкращі технологічні характеристики мають зразки, до складу яких було введено близько 40% фосфорного ефіру целюлози.

Встановлено характер залежності швидкості процесу фільтрування від витрати очищуваної води, товщини, щільності та композиційного складу МПФ. Отримані математичні моделі представлені поліномом другого порядку та дозволяють враховувати не тільки технічні характеристики, але і вплив композиційного складу МПФ на швидкість процесу фільтрування очищуваної води. З досліджених параметрів найбільші сили впливу на швидкість процесу фільтрування при сталих тиску та концентрації забруднення мають відсотковий вміст сульфатної віскозної чи сульфатної біленої целюлози у папероутворюючій масі досліджених зразків та витрати очищуваної води. Запропоновані математичні моделі дозволяють також визначити необхідний композиційний склад для отримання МПФ з заданими властивостями

Ключові слова: модифіковані целюлозні волокна, ефективність очищення, вода, модернізовані матеріали паперові фільтрувальні, сорбційні та фільтрувальні властивості, математичні моделі, технологічний регламент експлуатації

## **1. Вступ**

Властивості та рівень забрудненості води формують популяційне здоров'я населення. В зв'язку з цим виникає потреба в очищенні та кондиціонуванні води перед її використанням із застосуванням відповідних матеріалів та пристроїв [1, 2].

В період глобальної екологічної безпеки особливого значення набуває можливість регенерації чи утилізації фільтрувальних матеріалів для пристроїв, що забезпечують вилучення з різних середовищ, в першу чергу з водного, широкого спектру забруднювачів [2, 3].

Матеріали паперові фільтрувальні (МПФ) набули широкого використання завдяки своїй високій ефективності, відносній дешевизні, простоті утилізації [4].

Застосування паперових фільтрувальних елементів у спеціальних пристроях, які забезпечують підтримання найвищої чистоти очищуваного середовища, обмежується ресурсом, міцністю, фільтраційними, сорбційними та іншими властивостями.

У зв'язку з необхідністю забезпечення найвищої чистоти води у фармацевтичній та електронній промисловості, а також можливістю використання МПФ і для очищення повітря на атомних електростанціях; у фільтровентиляційних системах сховищ, лікувальних установ, операційних, виробничих цехах (бродильні відділення) харчової та фармацевтичної промисловості тощо, виникає потреба у математичній моделі за допомогою якої можна було б встановити композиційний склад МПФ, який надавав би зразкам потрібні властивості, необхідні в кожній конкретній ситуації.

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

Забруднення води є одним з основних факторів ризику для здоров'я, пов'язаних із навколишнім середовищем, що зумовлює потребу в належній її очистці перед використанням [1, 2]. Актуальною стає потреба у високоефективних сорбентах, що характеризуються одночасною бактерицидною дією, наприклад, для очищення питної води, води для фармацевтичної промисловості, або їх застосування у медичній практиці [3].

При фільтруванні різних середовищ мікробіологічні забруднення сорбуються матеріалами як з гранульованою, так і волокнистою структурою [4]. При цьому не лише зберігається життєздатність, а і йде розмноження мікроорганізмів [5]. В результаті відбувається біообростання сорбентів і викид продуктів життєдіяльності мікроорганізмів, а інколи і самих мікроорганізмів, у фільтрат [6]. Запобігання біообростанню фільтрувальних матеріалів та, зокрема, сорбентів залишається актуальною проблемою [7].

Відоме використання активованого вугілля з розміром часток від 0,1 до 2000 мкм, імпрегнованого сріблом, у комплексному способі глибокого очищення і кондиціонування води. Оброблювану воду піддають попередній фільтрації [8]. Срібло в іонній та молекулярній формах переходить в очищену/кондиціоновану воду, забруднюючи її [9].

Існують матеріали, отримані обробкою носія солями металу, наприклад, розчином солі срібла. Бактерицидна добавка знаходиться на поверхні цих мате-

ріалів або у вигляді ізольованих іонів, або у вигляді комплексних з'єднань. Ці матеріали не забезпечують необхідного рівня ефективності очищення від колоїдних часток і вірусів, розмір яких знаходиться в межах 10–30 нм [10]. До недоліків додається і те, що бактерицидні властивості використовуваних матеріалів визначаються іонами бактерицидних компонентів, що переходять в процесі фільтрування в середовище, що очищається, таким чином, забруднюючи його [11]. Для забезпечення тривалості збереження бактерицидних властивостей цих матеріалів потрібне просочення носіїв концентрованими розчинами солей металів. Відомо, що при певних підвищених концентраціях бактерицидних іонів металів вони отруйні для людини [12].

Введення до складу хімічно модифікованих природних сорбентів та штучних синтетичних складових суттєво змінює властивості МПФ [13].

Обробка МПФ полімерами на основі гуанідинів здатна запобігти розмноженню патогенних мікроорганізмів на їх поверхні, однак змінює і інші технологічні характеристики зразків [14].

У зв'язку з вищевикладеним найбільш виправданою є саме модернізація складу МПФ, яка б дозволила отримати необхідні властивості та подолати відомі недоліки. Це відкрило б шлях до широкого використання модернізованих матеріалів паперових фільтрувальних у фармацевтичній та електронній промисловості, на атомних електростанціях, у фільтровентиляційних системах сховищ, лікувальних установ, операційних, виробничих цехах (бродильні відділення) харчової та фармацевтичної промисловості, для доочистки питної води тощо.

Однак використання з метою унеможливлення біообростання біоцидів ускладнюється у зв'язку із зміною при обробці ними міцнісних, сорбційних, фільтраційних властивостей (які по своїй суті є визначальними для сфери застосування) матеріалів паперових фільтрувальних.

Дослідження технологічних характеристик отриманих зразків МПФ із знезаражуючими властивостями [14, 15], дозволить встановити силу впливу композиційного складу, в першу чергу папероутворюючих компонентів, на міцнісні, фільтраційні, сорбційні властивості зразків.

Розробка математичних моделей для розрахунку необхідного композиційного складу для отримання МПФ з заданими міцнісними, сорбційними, фільтраційними властивостями дозволить обґрунтувати робочі параметри технологічного регламенту виготовлення зразків із знезаражуючими властивостями з використанням полімерів на основі гуанідинів.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою досліджень є оцінка властивостей створених модернізованих матеріалів паперових фільтрувальних для розробки математичних моделей, які б дозволили здійснювати визначення композиційного складу матеріалів паперових фільтрувальних для отримання зразків із заданими необхідними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

– дослідити товщину, щільність та міцність у вологому стані створених матеріалів паперових фільтрувальних;

– визначити залежність фільтрувальних та сорбційних здатностей досліджуваних зразків матеріалів паперових фільтрувальних від їх композиційного складу;

– розробити математичні моделі, які дозволяли б розраховувати необхідний композиційний склад для отримання МПФ з заданими властивостями.

#### **4. Матеріали та методи дослідження фільтрувальних паперових матеріалів**

Для виготовлення модернізованих МПФ були використані: сульфідна віскозна целюлоза, сульфатна білена целюлоза, природний сорбент – палигорскіт (ПАЛ).

В лабораторних умовах описаними нижче способами було здійснено одержання карбоксиметилцелюлози низькозаміщеної (КМЦ-НЗ), фосфорного ефіру целюлози (ФЕЦ) та модернізованих МПФ.

Для одержання КМЦ-НЗ хімічний модифікації підлягала целюлоза сульфідна віскозна, подрібнена у вигляді грудок розміром 3×4 см. Активація целюлози здійснювалася на холоді при температурі від 0 до 5 °С протягом 30 хвилин їдким натром, з якого готували розчин з вмістом основної речовини 13 %. Співвідношення (целюлоза : луг) дорівнює 1:5.

Набухлу целюлозу заливали розчином монохлороцтової кислоти (МХОК) з вмістом основної речовини 37 % для проведення реакції О-алкілування. Модуль ванни за масою вихідної целюлози МХОК дорівнює 0,7. Одержана маса підігрівалася на водяній бані до 70 °С і витримувалася при цій температурі протягом 30 хвилин при періодичному струшуванні. Після цього маса охолоджувалася до кімнатної температури і її заливали розчином оцтової кислоти з вмістом основної речовини 5 % (на 75 г целюлози 1 дм<sup>3</sup> кислоти). Після ретельного перемішування масу віджимали на лійці Бюхнера і промивали дистильованою водою до нейтральної реакції промивних вод (рН 6,0–7,0). Одержаний продукт сушився на повітрі.

Для одержання ФЕЦ хімічний модифікації підлягала целюлоза сульфідна віскозна, подрібнена у вигляді грудок розміром 3 x 4 см.

Для приготування фосфориліруючого розчину використовували ортофосфору кислоту і карбамід. Целюлозу занурювали в заздалегідь нагрітий до 80 °С фосфориліруючий розчин і витримували в ньому при постійному перемішуванні протягом 50–60 хвилин.

Просочену фосфориліючим розчином целюлозу віджимали до 3-х разового збільшення ваги по відношенню до ваги вихідної целюлози, і сушили в сушильній шафі до вологості 2–4 %, після чого її піддавали термообробці при температурі 150 °С протягом 1 години.

Після термообробки матеріал промивали дистильованою водою до нейтральної реакції промивних вод і сушили на повітрі до вологості 6–10 %.

Описаним вище чином одержували фосфорний ефір целюлози в амонійній формі. Для його переведення в Н-форму використовували обробку 0,01 N розчином соляної кислоти з наступною промивкою продукту дистильованою водою.

Лабораторні зразки модернізованих варіантів фільтрувальних матеріалів виготовляли на апараті ЛАКВО. Безпосередньо перед використанням для виготовлення модернізованих варіантів матеріалів паперових фільтрувальних всі компоненти композиційного складу зразків подрібнювали та висушували в сушильній шафі з примусовою конвекцією при температурі  $70 \pm 3$  °С до постійної маси. Розмелювання волокнистих сорбентів проводили на дисковому лабораторному млині моделі МДЛ-01. При виготовленні зразків використовували дистильовану воду.

Для проведення досліджень з відпрацювання складу та оцінки властивостей модернізованих МПФ було виготовлено лабораторні зразки масою  $200 \text{ г/м}^2$  різного композиційного складу, що відрізняються вмістом похідних целюлози, типом целюлозної основи, наявністю природного сорбенту.

Введення до складу матеріалів паперових фільтрувальних, як модифікованих, так і не модифікованих глинистих природних сорбентів у досліджених кількостях не зумовлює змін об'ємно-просторових параметрів папероутворюючої маси та готових зразків [14, 15], що може бути пояснено розміщенням сорбентів цього виду у просторах між волокнами целюлози.

Зважаючи на те, що ПАЛ є різновидом глинистих природних мінералів із сорбційними властивостями, його вміст в композиційному складі враховувався понад 100 % папероутворюючого складу.

На основі сульфатної віскозної целюлози (СФІ) та сульфатної біленої целюлози (СФА) було виготовлено по 5 зразків МПФ.

Композиційний склад зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Композиційний склад зразків матеріалів паперових фільтрувальних на основі сульфатної віскозної та сульфатної біленої целюлози

На основі СФІ		На основі СФА	
Варіант МПФ	Композиційний склад	Варіант МПФ	Композиційний склад
1.1	100 % СФІ	2.1	100 % СФА
1.2	30 % СФІ + 70 % КМЦ-НЗ	2.2	30 % СФА + +70 % КМЦ-НЗ+ПАЛ*
1.3	30 % СФІ + 70 % ФЕЦ	2.3	30 % СФА + 70 % ФЕЦ
1.4	40 % СФІ + 60 % ФЕЦ	2.4	40 % СФА + 60 % ФЕЦ
1.5	50 % СФІ + 50 % ФЕЦ	2.5	50 % СФА + 50 % ФЕЦ

*Примітка: \* – зважаючи на те, що папероутворюючими компонентами є СФІ, СФА, ФЕЦ та КМЦ-НЗ, а ПАЛ належить до глинистих природних мінералів, які не змінюють об'ємно-просторових параметрів папероутворюючої маси та готових зразків, сорбент в композиційному складі враховувався понад 100 % папероутворюючого складу*

Зважаючи на відсутність методів визначення вмісту модифікованих целюлозних волокон у складі паперових фільтрувальних матеріалів, а також попередню підготовку компонентів композиційного складу зразків, вміст кожного з

компонентів у відповідних виготовлених зразках, що досліджували, приймали згідно табл. 1.

Досліджували наступні характеристики целюлози та модернізованих варіантів МПФ: товщина, щільність, міцність у вологому стані. Вимірювання товщини здійснювали з використанням товщиномірів з встановленими характеристиками при визначеному тиску. Визначення щільності здійснювали розрахунковим шляхом, виходячи з маси досліджуваного зразку площею  $1 \text{ м}^2$  і його вимірної товщини, що відповідає міжнародним стандартам ISO 439-80 і ISO 534-80. Визначення міцності у вологому стані базувалося на вимірюванні максимального зусилля, яке витримує зразок під час розтягування, методом навантажування з постійною швидкістю.

Фільтрувальні та сорбційні характеристики визначали шляхом фільтрування модельного розчину хлорного заліза при температурі  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , з концентрацією загального заліза у вихідному розчині  $0,63 \pm 0,02 \text{ мг/дм}^3$  через відповідний зразок МПФ площею  $39,57 \text{ см}^2$  під тиском 500 мм водяного стовпа.

## 5. Результати досліджень фільтрувальних паперових матеріалів та фільтраційно-сорбційних процесів з їх використанням

### 5.1. Технологічні характеристики отриманих зразків

Дані щодо товщини, щільності та міцності у вологому стані отриманих зразків матеріалів паперових фільтрувальних наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Технологічні характеристики матеріалів паперових фільтрувальних на основі сульфітної віскозної та сульфатної біленої целюлози\*

На основі СФІ				На основі СФА			
Варіант МПФ	Товщина, мкм	Щільність, г/см <sup>2</sup>	Міцність у вологому стані, Н	Варіант МПФ	Товщина, мкм	Щільність, г/см <sup>2</sup>	Міцність у вологому стані, Н
1.1	450	0,47	4,0	2.1	390	0,56	5,4
1.2	500	0,43	1,7	2.2	425	0,52	3,0
1.3	440	0,50	3,8	2.3	423	0,51	4,6
1.4	432	0,50	3,8	2.4	420	0,51	3,7
1.5	434	0,48	3,9	2.5	405	0,51	4,5

Примітка: \* – відносна похибка визначення товщини не перевищує 7,5 %, щільності – 8,5 %

## 5. 2. Фільтрувальні та сорбційні здатності досліджуваних зразків матеріалів паперових фільтрувальних різного композиційного складу

Встановлені осереднені дані фільтрувальної та сорбційної здатності варіантів МПФ в залежності від типу целюлозної основи наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Осереднена фільтрувальна та сорбційна здатність матеріалів паперових фільтрувальних в залежності від типу целюлозної основи

На основі СФІ				На основі СФА			
Варіант МПФ	Кількість фільтрованої води, дм <sup>3</sup>	Швидкість фільтрування, дм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> ·хв	Сорбція заліза, %	Варіант МПФ	Кількість фільтрованої води, дм <sup>3</sup>	Швидкість фільтрування, дм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> ·хв	Сорбція заліза, %
1.1	1	3,6	55,1	2.1	1	1,14	75,5
	2	0,7	79,9		2	0,2	84,9
1.2	1	5,9	87,0	2.2	1	5,0	69,2
	2	1,2	88,9		2	1,1	81,0
1.3	1	7,5	34,4	2.3	1	0,7	81,7
	2	6,6	40,4		2	0,35	88,0
1.4	1	0,47	41,6	2.4	1	1,7	81,2
	2	0,16	92,2		2	0,5	100,0
1.5	1	0,40	62,6	2.5	1	0,7	82,5
	2	0,23	93,6		2	0,35	89,0

## 5. 3. Математичні моделі для розрахунку необхідного композиційного складу папероутворюючої маси для отримання зразків матеріалів паперових фільтрувальних із заданими властивостями

В процесі фільтрування рідин значну роль відіграє швидкість фільтрування, яка в свою чергу залежить від характеру подачі очищеної дисперсної системи, товщини та щільності фільтрувального елемента. Для побудови математичної моделі визначення швидкості фільтрування від кількості фільтрованої рідини, товщини та щільності паперового фільтру, вмісту СФІ/СФА у папероутворюючій масі при постійному тиску у вигляді полінома другого порядку проведено експериментальні дослідження повного факторного експерименту. Рівні варіювання факторів представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Рівні варіювання факторів

Фактори	Позначення факторів	$x_i^*=-1,68$	$x_i=-1$	$x_i=0$	$x_i=1$	$x_i^*=1,68$
Кількість фільтрованої рідини $Q$ , дм <sup>3</sup>	$x_1$	0,66	1	1,5	2	2,34
Товщина паперового фільтру $\delta$ , мкм	$x_2$	400	420	450	480	500

Щільність паперового фільтру $\rho$ , г/см <sup>2</sup>	$x_3$	0,4	0,42	0,45	0,48	0,5
Вміст СФІ/СФА $c$ , %	$x_4$	0	30	50	80	100

Кодування факторів здійснюємо за допомогою перетворення:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (1)$$

де  $x_j$  – кодоване значення фактора;  $\tilde{x}_j$  – натуральне значення фактора;  $\tilde{x}_{j0}$  – натуральне значення основного рівня;  $I_j$  – інтервал варіювання;  $j$  – номер фактора.

Відобразимо обраховані за формулою перетворення матрицю плану та відповідні отримані результати експерименту (табл. 5).

Таблиця 5  
Матриця плану і результати експерименту

№ досліджу	Кодоване значення факторів в експерименті					
	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$	Для СФІ	Для СФА
					$\nu$ , дм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> ·хв	
1	-1	-1	-1	1	1,88	1,72
2	1	-1	-1	1	1,32	1,12
3	-1	1	-1	1	1,55	1,52
4	1	1	-1	1	1,56	1,6
5	-1	-1	1	1	1,84	1,64
6	1	-1	1	1	1,09	0,86
7	-1	1	1	1	1,1	0,89
8	1	1	1	1	0,95	0,72
9	-1	-1	-1	-1	1,47	1,47
10	1	-1	-1	-1	0,95	0,75
11	-1	1	-1	-1	1,15	0,96
12	1	1	-1	-1	1,21	1,1
13	-1	-1	1	-1	2,15	2,15
14	1	-1	1	-1	1,39	1,15
15	-1	1	1	-1	1,4	1,17
16	1	1	1	-1	1,25	0,99
17	1,68	0	0	0	0,75	0,74
18	-1,68	0	0	0	1,34	1,37
19	0	1,68	0	0	0,83	0,88
20	0	-1,68	0	0	1,26	1,48
21	0	0	1,68	0	1,1	1,14
22	0	0	-1,68	0	1,15	1,21



23	0	0	0	1,68	2,01	1,38
24	0	0	0	-1,68	1,88	1,4
25	0	0	0	0	1,03	1,05
26	0	0	0	0	1,0	1,1
27	0	0	0	0	1,05	1,16
28	0	0	0	0	1,15	1,2
29	0	0	0	0	1,12	1,03
30	0	0	0	0	1,04	1,17
31	0	0	0	0	1,1	1,08

В даному випадку математична модель для повного чотирьох факторного експерименту з ефектом взаємодії має вигляд:

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\
& + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + \\
& + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2.
\end{aligned} \tag{2}$$

Коефіцієнти моделі обчислюємо за формулою:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \tag{3}$$

де  $j=0, 1, 2, \dots, k$ ;  $N$  – кількість виконаних дослідів ( $N=31$ ).

Коефіцієнти моделі (2), які розраховано за формулою (3), становлять:  
– для СФІ:

$$b_0 = 1,1; b_1 = -0,18; b_2 = -0,13; b_3 = -0,0004; b_4 = 0,03;$$

$$b_{12} = 0,16; b_{13} = -0,06; b_{14} = -0,0015; b_{23} = -0,11;$$

$$b_{24} = -0,06; b_{34} = -0,18; b_{11} = 0,01;$$

$$b_{22} = 0,01; b_{33} = 0,034; b_{44} = 0,34.$$

– для СФА:

$$b_0 = 1,11; b_1 = -0,2; b_2 = -0,13; b_3 = -0,01; b_4 = 0,04;$$

$$b_{12} = 0,16; b_{13} = -0,06; b_{14} = -0,0015; b_{23} = -0,11; b_{24} = -0,06;$$

$$b_{34} = -0,18; b_{11} = 0,01; b_{22} = 0,014; b_{33} = 0,012; b_{44} = 0,112.$$

Дисперсію  $S_y^2$  відтворюваності визначаємо по результатам досліджень в центрі плану. Дисперсії, що характеризують помилки в визначенні коефіцієнтів рівняння регресії, згідно [16] при  $k = 4$  становлять:

– для СФІ:

$$S^2 \{b_0\} = 0,0526; S^2 \{b_i\} = 0,0299;$$

$$S^2 \{b_{ii}\} = 0386; S^2 \{b_{ii}\} = 0288;$$

– для СФА:

$$S^2 \{b_0\} = 0,0629; S^2 \{b_i\} = 0358;$$

$$S^2 \{b_{ii}\} = 0464; S^2 \{b_{ii}\} = 0,0345.$$

При перевірці коефіцієнтів за критерієм Ст'юдента (при 5 %-му рівні значимості та числі ступеню свободи  $f = 5$ ) встановлено, що коефіцієнти  $b_3; b_{14}; b_{11}; b_{22}$  (для СФІ) та  $b_3; b_{14}; b_{11}; b_{22}; b_{33}$  (для СФА) менше довірчого інтервалу, тому їх можна визнати статистично не значимими і виключити із моделі (2).

Підставивши знайдені коефіцієнти в рівняння (2), отримаємо наступне співвідношення:

– для СФІ:

$$\begin{aligned} y = & 1,1 - 0,18 \cdot \tilde{x}_1 - 0,13 \cdot \tilde{x}_2 + 0,03 \cdot \tilde{x}_4 + \\ & + 0,16 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 - 0,06 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 - 0,11 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 - \\ & - 0,06 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_4 - 0,18 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4 + 0,034 \cdot \tilde{x}_3^2 + 0,34 \cdot \tilde{x}_4^2. \end{aligned} \quad (4)$$

– для СФА:

$$\begin{aligned} y = & 1,11 - 0,2 \cdot \tilde{x}_1 - 0,13 \cdot \tilde{x}_2 + 0,04 \cdot \tilde{x}_4 + \\ & + 0,16 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 - 0,06 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 - 0,11 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 - \\ & - 0,06 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_4 - 0,18 \cdot \tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4 + 0,112 \cdot \tilde{x}_4^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Перевірка гіпотези адекватності моделей (4) та (5) за критерієм Фішера при 5 %-му рівні значущості і числах ступенів свободи дисперсії адекватності

$$f_{ad} = N - k' - (n_0 - 1) = 31 - 14 - (7 - 1) = 11$$

і дисперсії відтворюваності

$$f_y = n_0 - 1 = 7 - 1 = 6$$

показала, що отримані моделі адекватні, оскільки розрахункове значення критерію менше табличного

$$F_{cal} = 2,84 < F_T(0,05; 11; 6) = 3,09 \text{ (для СФІ)}$$

та

$$F_{cal} = 2,45 < F_T(0,05; 11; 6) = 3,09 \text{ (для СФА)}.$$

У рівняннях (4)–(5) змінні значення  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ ,  $\tilde{x}_3$ ,  $\tilde{x}_4$  є кодовані величини:

$$\tilde{x}_1 = \frac{Q - 1,5}{0,5};$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{\delta - 450}{30};$$

$$\tilde{x}_3 = \frac{\rho - 0,45}{0,03};$$

$$\tilde{x}_4 = \frac{c - 50}{30}, \quad (6)$$

де  $Q$  – кількість фільтрованої рідини,  $\text{дм}^3$ ;  $\delta$  – товщина паперового фільтру,  $\text{мкм}$ ;  $\rho$  – щільність паперового фільтру,  $\text{г/см}^2$ ;  $c$  – вміст СФІ, %.

Для зручності обчислень математичну модель (4)–(5) переведемо в натуральну величину:

– для СФІ:

$$\begin{aligned} v_1 = & -15,1 - 3,4 \cdot Q + 0,04 \cdot \delta + 36,4 \cdot \rho + \\ & + 0,08 \cdot c + 0,011 \cdot Q \cdot \delta - 4 \cdot Q \cdot \rho - 0,12 \cdot \delta \cdot \rho - \\ & - 7 \cdot 10^{-5} \cdot \delta \cdot c - 0,2 \cdot \rho \cdot c + 37,8 \cdot \rho^2 + 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot c^2; \end{aligned} \quad (7)$$

– для СФА:

$$\begin{aligned} v_2 = & -22,4 - 3,4 \cdot Q + 0,04 \cdot \delta + 70 \cdot \rho + \\ & + 0,11 \cdot c + 0,011 \cdot Q \cdot \delta - 4 \cdot Q \cdot \rho - 0,12 \cdot \delta \cdot \rho - \\ & - 7 \cdot 10^{-5} \cdot \delta \cdot c - 0,2 \cdot \rho \cdot c + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot c^2, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $v_1$  – швидкість фільтрування очищеної води через МПФ на основі СФІ,  $\text{дм}^3/\text{см}^2$ ;  $v_2$  – швидкість фільтрування очищеної води через МПФ на основі СФА,  $\text{дм}^3/\text{см}^2$ .

За допомогою математичних моделей (7)–(8) можна визначити швидкість фільтрування при постійному тиску очищеної води та підібрати необхідні характеристики матеріалів паперових фільтрувальних для вирішення відповідних завдань.

Залежність швидкості фільтрування модельного розчину хлорного заліза під тиском 500 мм водяного стовпа від відсоткового вмісту СФІ чи СФА у папероутворюючій масі дослідних зразків представлена на рис. 1, 2.

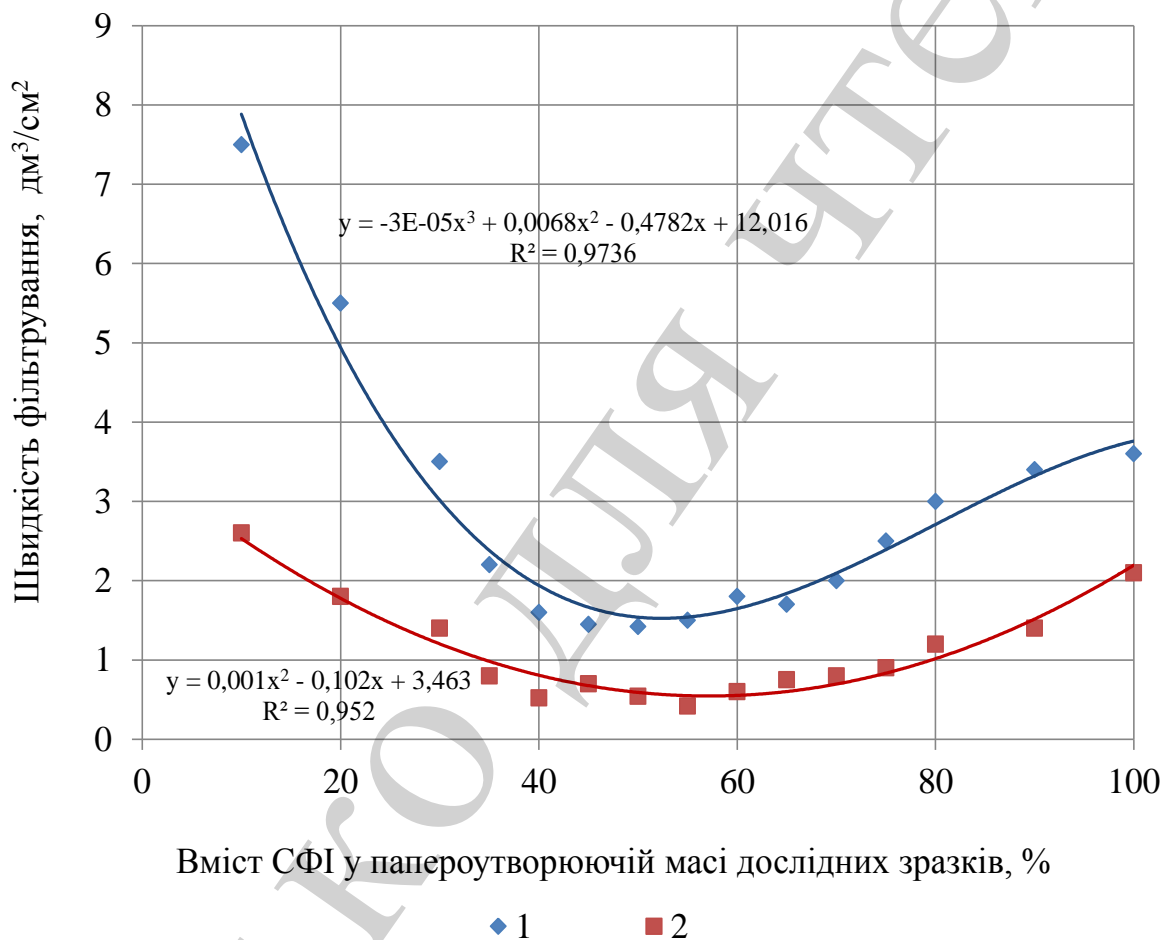


Рис. 1. Залежність швидкості фільтрування води МПФ від вмісту СФІ:  
1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

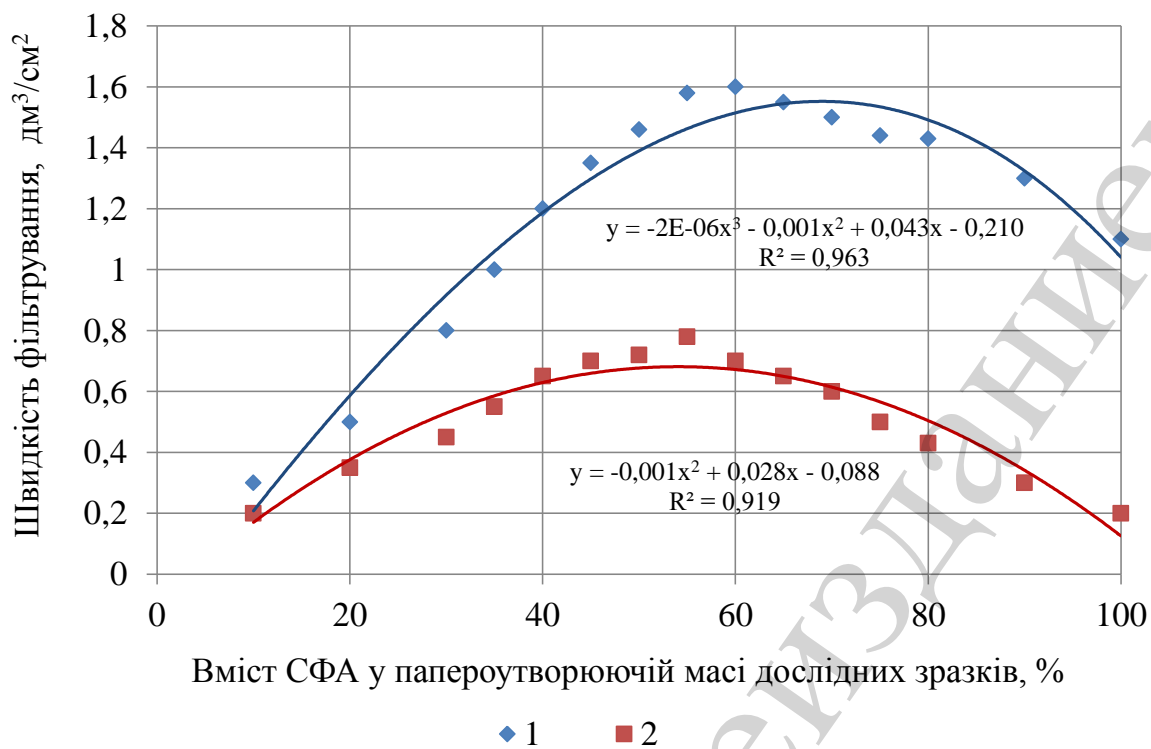


Рис. 2. Залежність швидкості фільтрування води МПФ від вмісту СФА:  
1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

Залежність сорбції заліза з модельного розчину (вихідна концентрація –  $0,63 \pm 0,02 \text{ мг/дм}^3$ ) від відсоткового вмісту СФІ чи СФА у папероутворюючій масі дослідних зразків представлена на рис. 3, 4.

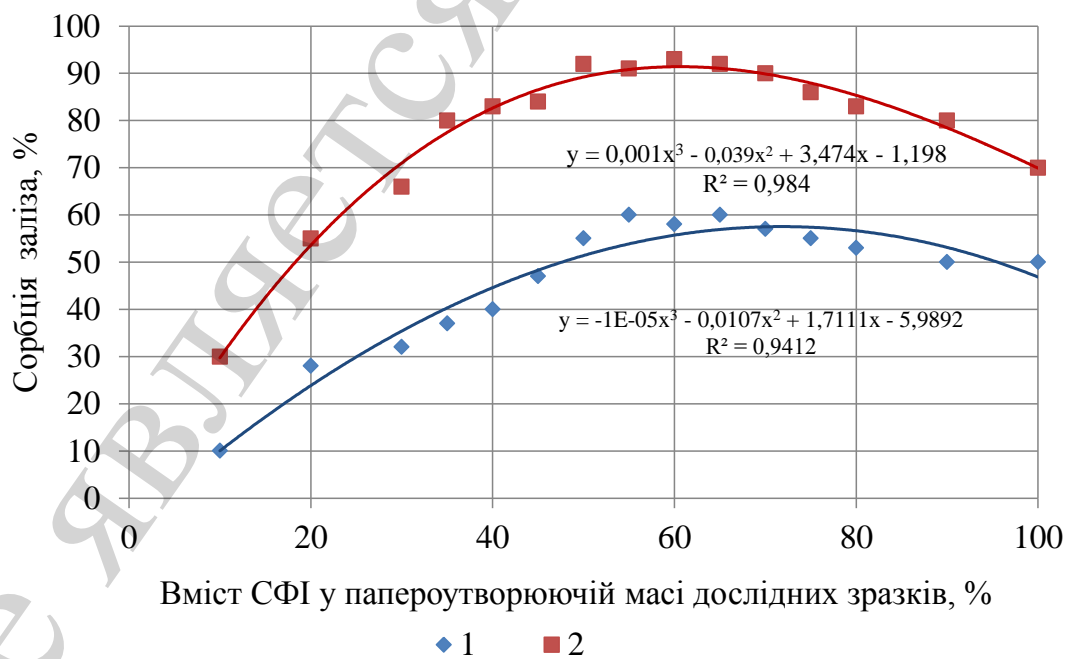


Рис. 3. Залежність сорбції заліза МПФ від вмісту СФІ:  
1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

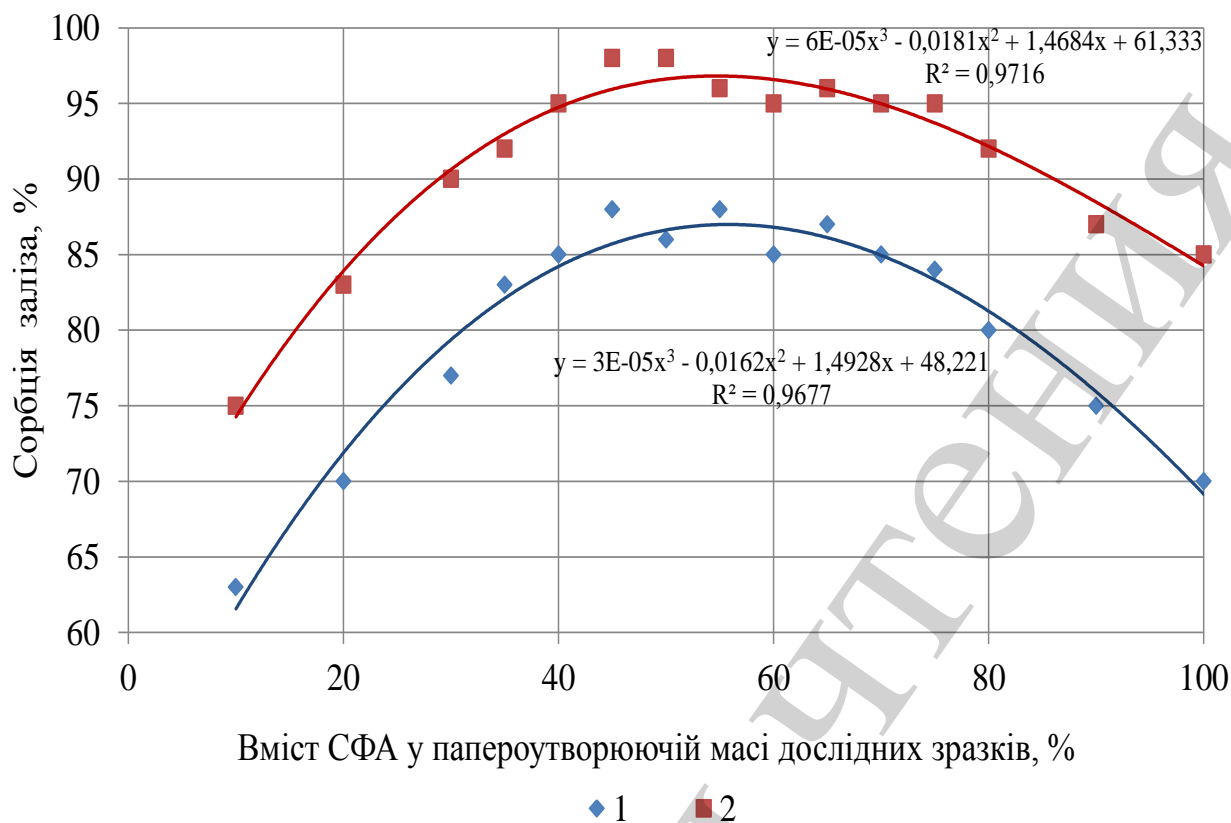


Рис. 4. Залежність сорбції заліза МПФ від вмісту СФА:  
1 – при  $Q=1$  дм<sup>3</sup>; 2 – при  $Q=2$  дм<sup>3</sup>

Графічні залежності фільтрувальної та сорбційної здатностей варіантів МПФ від їх товщини та щільності представлені на рис. 5, 6 (для МПФ на основі СФІ) та рис. 7, 8 (для МПФ на основі СФА).

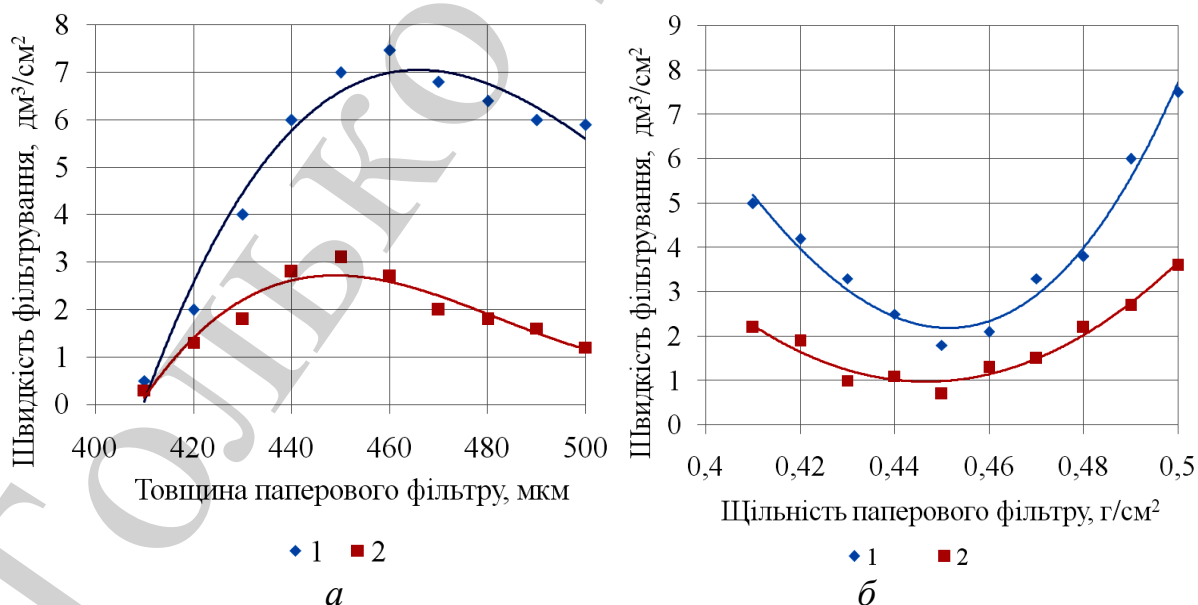


Рис 5. Залежність швидкості фільтрування води через МПФ на основі СФІ:  
*a* – від товщини; *б* – від щільності; 1 – при  $Q=1$  дм<sup>3</sup>; 2 – при  $Q=2$  дм<sup>3</sup>

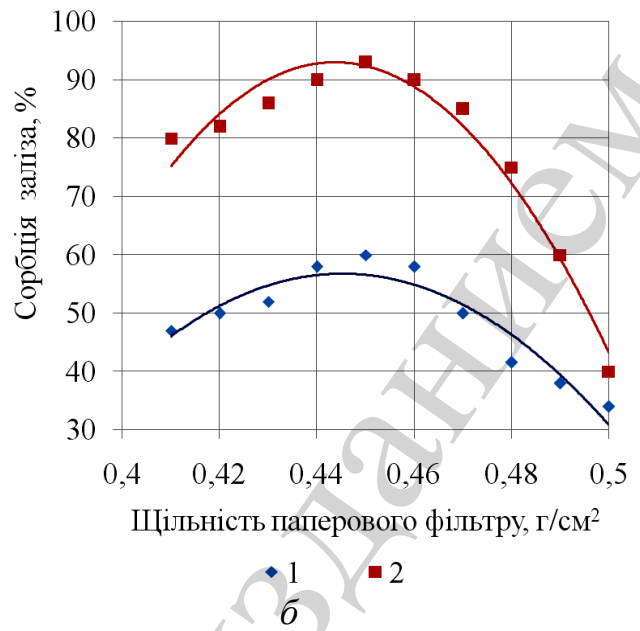
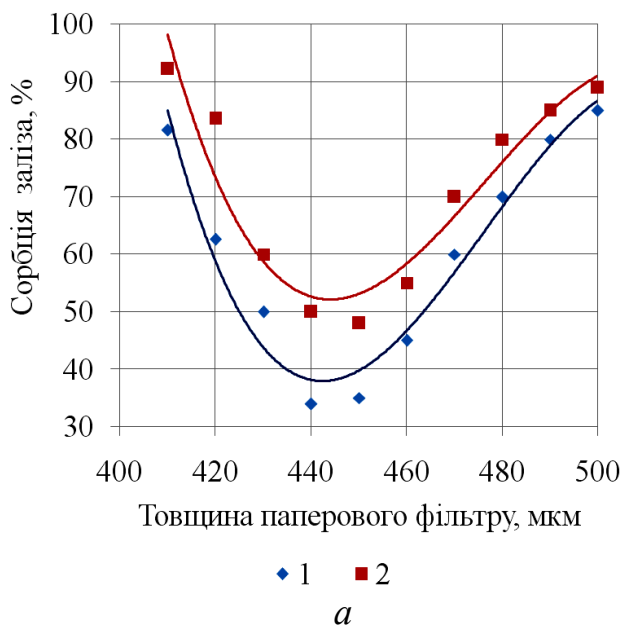


Рис. 6. Залежність сорбції заліза МПФ на основі СФІ:  
*a* – від товщини; *б* – від щільності; 1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

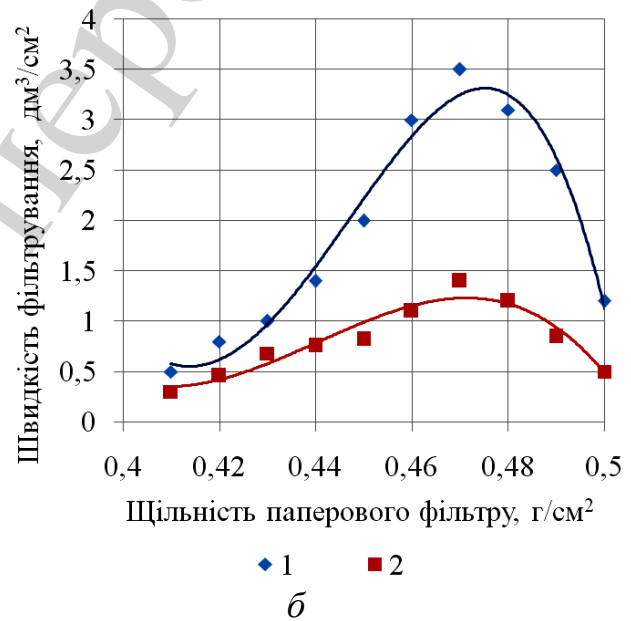
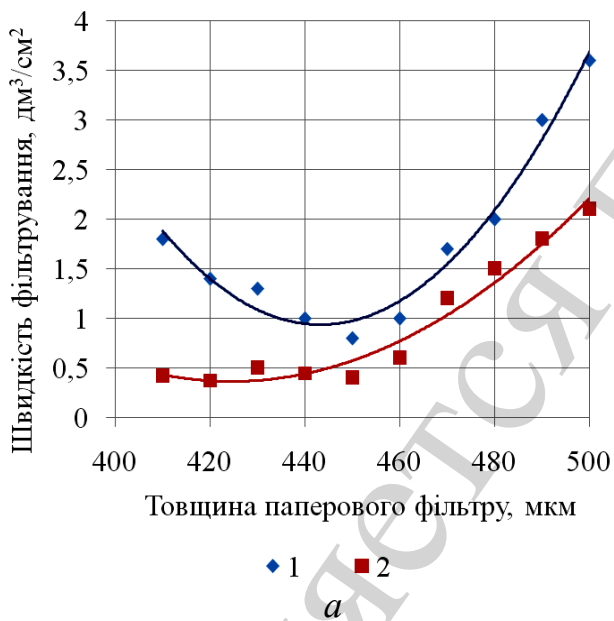


Рис. 7. Залежність швидкості фільтрування води через МПФ на основі СФА:  
*a* – від товщини; *б* – від щільності; 1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

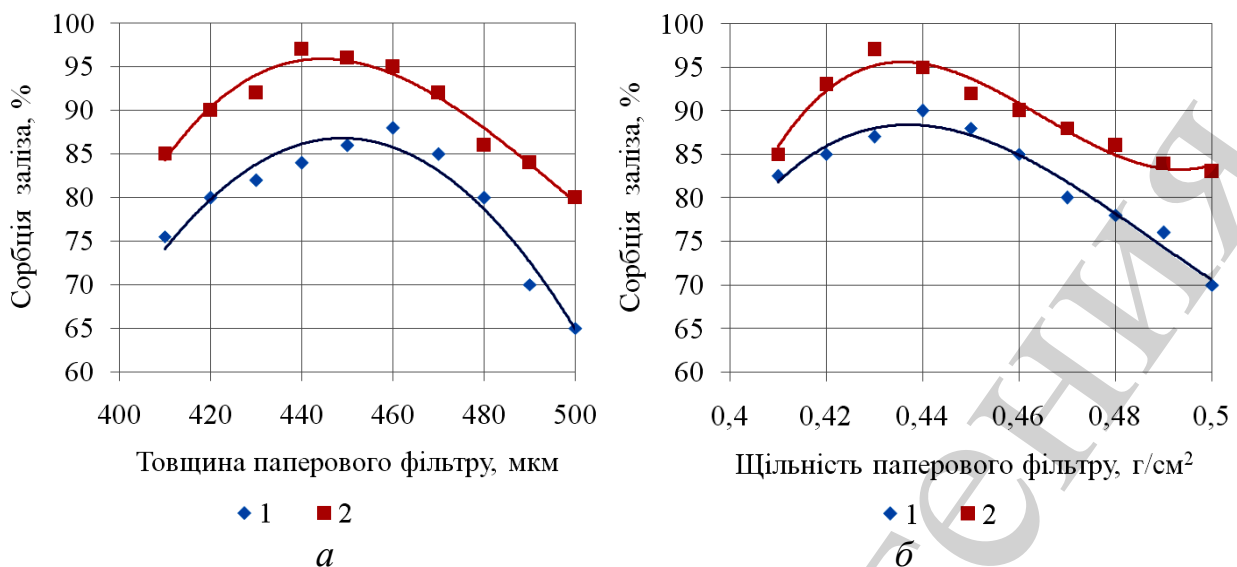


Рис. 8. Залежність сорбції заліза МПФ на основі СФА:  
 а – від товщини; б – від щільності; 1 – при  $Q=1 \text{ дм}^3$ ; 2 – при  $Q=2 \text{ дм}^3$

## 6. Обговорення результатів дослідження паперових фільтрувальних матеріалів

Проведені дослідження дозволили виявити залежність фільтрувальних і сорбційних здатностей матеріалів паперових фільтрувальних від їх композиційного складу, товщини та щільності.

Однаковий характер отриманих кривих (рис. 1, 2) при різних кількостях фільтрованої води ( $Q$ ) дозволяє умовно виокремити різні за своєю природою впливи на швидкість фільтрування через досліджувані зразки матеріалів паперових фільтрувальних, а саме: пов'язані з введенням до складу зразків матеріалів паперових фільтрувальних певних компонентів та пов'язані з феноменом набування целюлозних волокон. З позицій сучасної наукової думки з метою зменшення часу та кількості спостережень, інтерполяція закономірностей, отриманих в агравованих умовах, на весь процес в цілому є цілком допустимою. Таким чином, з точки зору виявлення впливу на швидкість фільтрування саме компонентів композиційного складу, а не результатів їх взаємодії з середовищем, що проходить очистку, більш значимими є дані, що лягли в основу побудови кривої 1, а криву 2 умовно можна вважати зміненою інформаційним шумом. Дане твердження є очевидним та справедливим і для інших експериментально встановлених залежностей.

Аналіз одержаних даних щодо фізико-механічних показників, фільтрувальних та сорбційних характеристик модифікованих МПФ дозволив встановити наступне:

- найкращі міцнісні характеристики у вологому стані мають контрольні зразки, до складу яких входить або лише сульфатна білена целюлоза, або лише сульфатна віскозна целюлоза – 5,4 Н та 4,0 Н відповідно;
- зразки МПФ із сульфатної целюлози характеризуються меншими значеннями щільності, міцності у вологому стані, ефективності очищення від іонів заліза, але більшими значеннями швидкості фільтрування, ніж аналогічні зраз-



ки із сульфатної целюлози;

– використання КМЦ-НЗ та природного сорбенту ПАЛ в композиції МПФ призводить до зниження щільності, міцності у вологому стані, збільшення швидкості фільтрування, однак значення ефективності очищення від іонів заліза  $Fe^{+3}$  вища у варіантів на основі сульфатної целюлози;

– композиції із добавками фосфорного ефіру целюлози (ФЕЦ) характеризуються зменшенням щільності, міцності у вологому стані, зменшенням швидкості фільтрування у зразків на основі сульфатної біленої целюлози, або зростанням у зразків на основі сульфатної целюлози;

– найкраща фільтраційна здатність характерна для зразків склад папероутворюючих компонентів яких на 70 % представлений фосфорним ефіром целюлози та на 30 % – сульфатною віскозною целюлозою (швидкість фільтрування  $6,6-7,5 \text{ дм}^3/\text{см}^2$  за хвилину), або на 70 % карбоксиметилцелюлозою низькозаміщеною та на 30 % – сульфатною біленою целюлозою (швидкість фільтрування  $1,1-5,0 \text{ дм}^3/\text{см}^2$  за хвилину);

– введення до складу МПФ ФЕЦ підвищує ефективність сорбції іонів заліза;

– найкраща сорбційна здатність по відношенню до заліза характерна для зразків склад папероутворюючих компонентів яких на 60% представлений фосфорним ефіром целюлози та на 40 % – сульфатною біленою целюлозою (81,2–100 %) або на 50 % фосфорним ефіром целюлози та на 50 % – сульфатною віскозною целюлозою (62,6–92,3 %).

Встановлено, що зразки із найвищою щільністю та найменшою товщиною та зразки із найменшою щільністю та найбільшою товщиною мають більшу фільтраційну та сорбційну здатність, ніж зразки із середніми значеннями щільності та товщини. Це дозволяє припустити, що на фільтрувальні та сорбційні характеристики впливає також і просторове розташування волокнистих сорбентів у фільтруючому шарі МПФ, що може бути пов'язане із феноменом набухання целюлозних волокон у вологому стані.

Зміни характеристик матеріалів паперових фільтрувальних після набухання целюлозних волокон, які входять до їх складу, обов'язково повинні бути враховані в технологічному регламенті експлуатації пристроїв на їх основі. Також слід врахувати бажаність постійності тиску очищуваної рідини, що є справедливим для абсолютно всіх відомих на даний час пристроїв для очистки води.

Найбільш перспективними для проведення подальшого вивчення, в першу чергу, слід вважати варіанти матеріалів паперових фільтрувальних 1.1 (в якості контролю); 1.4; 2.1 (в якості контролю); 2.4.

## **7. Висновки**

1. Введення до складу матеріалів паперових фільтрувальних фосфорного ефіру целюлози змінює їх товщину, щільність та міцність. Характер змін залежить в тому числі і від типу целюлозної основи зразків: сульфатна віскозна чи сульфатна білена целюлоза. Оптимальну комбінацію технологічних характеристик мають зразки, до складу яких було введено близько 40 % фосфорного ефіру целюлози.

2. Введення до складу модифікованих матеріалів паперових фільтрувальних досліджених похідних целюлози призводить до різних впливів на фільтрувальну та сорбційну здатності зразків, що залежить, в першу чергу, від типу їх целюлозної основи. Набухання целюлозних волокон зменшує силу впливу композиційного складу досліджених зразків матеріалів паперових фільтрувальних на їх фільтрувальну здатність та збільшує силу його впливу на їх сорбційну здатність. Використання природного не модифікованого палигорскіту у складі матеріалів паперових фільтрувальних не підвищує їх сорбційної здатності та ємності по відношенню до заліза, в зв'язку з чим можна вважати недоцільним використання природних глинистих сорбентів без їх попередньої хімічної модифікації. Питання доцільності введення до складу матеріалів паперових фільтрувальних модифікованих природних сорбентів потребує подальшого вивчення.

3. Розроблені математичні моделі дозволяють визначити швидкість процесу фільтрування при сталому тиску та концентрації забруднення від витрати фільтрованої води, товщини, щільності та композиційного складу матеріалів паперових фільтрувальних. З досліджених параметрів найбільші сили впливу на швидкість процесу фільтрування при сталих тиску та концентрації забруднення мають відсотковий вміст сульфатної віскозної чи сульфатної біленої целюлози у папероутворюючій масі досліджених зразків та витрати очищеної води. Запропоновані математичні моделі дозволяють також визначити необхідний композиційний склад для отримання МПФ з заданими властивостями.

4. При виготовленні матеріалів паперових фільтрувальних із необхідними заданими властивостями та їх використанні обов'язково потрібно враховувати вплив набухання целюлозних волокон на їх виробничі характеристики, що має знайти необхідне відображення в технологічних регламентах експлуатації пристроїв на їх основі.

## Література

1. Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of Disease. World Health Organization, 2016. 121 p. URL: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf>
2. Ukraine's population water supply: nowadays realities and ecologically-hygienic assessment of possible ways of branch's development / Zagorodniuk K., Bardov V., Omelchuk S., Zagorodniuk Yu., Pelo I. // The Unity of science. 2015. Issue 4. P. 193–202.
3. Gardi I., Mishael Y. G. Designing a regenerable stimuli-responsive grafted polymer-clay sorbent for filtration of water pollutants // Science and Technology of Advanced Materials. 2018. Vol. 19, Issue 1. P. 588–598. doi: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1499381>
4. Оцінка ефективності вилучення вірусів із питної води матеріалами паперовими фільтрувальними на основі модифікованих целюлоз та бентонітових глин / Загороднюк Ю. В., Широбоків В. П., Войцеховський В. Г., Никитюк О. А., Омельчук С. Т., Гринзовський А. М., Загороднюк К. Ю. // Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. Київ: НМУ, 2017. С. 112–114.

5. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013 / Forouzanfar M. H., Alexander L., Anderson H. R., Bachman V. F., Biryukov S., Brauer M. et. al. // *The Lancet*. 2015. Vol. 386, Issue 10010. P. 2287–2323. doi: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(15\)00128-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(15)00128-2)
6. Results-based aid with lasting effects: sustainability in the Salud Mesoamérica Initiative / El Bcheraoui C., Kamath A. M., Dansereau E., Palmisano E. B., Schaefer A., Hernandez B., Mokdad A. H. // *Globalization and Health*. 2018. Vol. 14, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1186/s12992-018-0418-x>
7. Morbidity and mortality due to shigella and enterotoxigenic *Escherichia coli* diarrhoea: the Global Burden of Disease Study 1990–2016 / Khalil I. A., Troeger C., Blacker B. F., Rao P. C., Brown A., Atherly D. E. et. al. // *The Lancet Infectious Diseases*. 2018. Vol. 18, Issue 11. P. 1229–1240. doi: [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(18\)30475-4](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(18)30475-4)
8. Watson K., Farré M. J., Knight N. Comparing a silver-impregnated activated carbon with an unmodified activated carbon for disinfection by-product minimisation and precursor removal // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 542. P. 672–684. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.125>
9. Maillard J.-Y., Hartemann P. Silver as an antimicrobial: facts and gaps in knowledge // *Critical Reviews in Microbiology*. 2012. Vol. 39, Issue 4. P. 373–383. doi: <https://doi.org/10.3109/1040841x.2012.713323>
10. Effect of preconditioning on silver leaching and bromide removal properties of silver-impregnated activated carbon (SIAC) / Rajaeian B., Allard S., Joll C., Heitz A. // *Water Research*. 2018. Vol. 138. P. 152–159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.026>
11. Silver coordination compounds: A new horizon in medicine / Medici S., Peana M., Crisponi G., Nurchi V. M., Lachowicz J. I., Remelli M., Zoroddu M. A. // *Coordination Chemistry Reviews*. 2016. Vol. 327-328. P. 349–359. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.05.015>
12. Chekman I. S. Pharmacological Properties of Nanometals (Silver, Copper, Iron) // *Nauka ta innovacii*. 2015. Vol. 11, Issue 1. P. 72–77. doi: <https://doi.org/10.15407/scin11.01.072>
13. Гігієнічна оцінка модифікованих паперових фільтрувальних матеріалів на основі сульфітної віскозної целюлози / Загороднюк К. Ю., Гринзовський А. М., Коробочка О. М., Омельчук С. Т., Загороднюк Ю. В., Войцеховський В. Г., Авер'янов В. С. // *Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України: зб. тез доп. наук.-практ. конф. Київ, 2018*. С. 308–310.
14. Разработка метода удаления возбудителей холеры и энтеровирусов из питьевой воды в условиях чрезвычайных ситуаций и его гигиеническая оценка / Загороднюк Ю. В., Войцеховский В. Г., Омельчук С. Т., Гринзовский А. М., Загороднюк К. Ю. // *Місто будівлепланування і управління прибережними територіями: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Сергіївка, 2017*. С. 28–30.

15. Экспериментальное обоснование методов удаления и концентрации энтеровирусов из питьевой воды / Загороднюк Ю. В., Войцеховский В. Г., Бойко И. И., Омельчук С. Т., Загороднюк К. Ю. // Микробиология: от микроскопа до нанотехнологий: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2013. С. 35–36.

16. Шкляр В. Н. Планирование эксперимента и обработка результатов. Томск: ТПУ, 2010. 90 с.

Только для чтения