

## ФЛОТОЕКСТРАКЦІЯ БРОМКРЕЗОЛОВОГО ЗЕЛЕНОГО З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

Обушенко Т. І., Толстопалова Н. М., Баранюк Н. В.

Об'єктом дослідження є стічні води, забруднені барвниками. Наявні методи очищення стічних вод від барвників досить часто недосконалі, неефективні або ж відсутні. Це зумовлює необхідність розроблення та впровадження ефективних і недорогих у використанні та експлуатації технологій очищення від барвників. При очищенні стічних вод найбільша проблема – видалення барвників з розбавлених низькоконцентрованих розчинів. Для очищення таких стоків запропоновано флотоекстракцію. Цей метод заснований на комбінації методів флотації і екстракції, та на пропусканні газових бульбашок крізь водну фазу і винесенні речовини забрудника (сублату) в органічну фазу.

В ході дослідження використовувалися імітати стічних вод, забруднених аніонним барвником бромкрезоловим зеленим в інтервалі концентрацій 2–20 мг/дм<sup>3</sup>. Досліджено вплив деяких параметрів на ступінь вилучення барвника: рН вихідного розчину, молярне співвідношення ПАР:Барвник, розмір пухирців повітря, вихідна концентрація барвника, тривалість флотоекстракції. Встановлено раціональні умови видалення барвника: рН 3–3,5, молярне співвідношення бромкрезоловий зелений – гексадецилпіридиній хлорид = 1:1. Найефективніше видалення барвника забезпечується при використанні фільтру Шотта з діаметром пор 100 мкм, витраті повітря 110–120 см<sup>3</sup>/хв., тривалості процесу 10 хв. За цих умов ступінь видалення барвника складає 88–99 %.

Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого методу для ефективного видалення барвників з низькоконцентрованих водних розчинів. Метод має ряд переваг:

- можливість роботи з великими об'ємами водних об'єктів;
- активна речовина виноситься бульбашками газу і надходить у шар гідрофобної рідини без змішування фаз;
- процес не є рівноважним і не лімітується константою розподілу;
- неможливість утворення емульсій;
- багаторазове концентрування іонів у невеликих об'ємах органічного розчинника;
- потребує невеликої кількості екстрагенту у порівнянні з рідинною екстракцією.

**Ключові слова:** флотоекстракція барвників, поверхнево-активні речовини, стічні води, бромкрезоловий зелений, гексадецилпіридиній хлорид.

## 1. Вступ

Велика кількість стічних вод містить різноманітні барвники, які є токсичними та небезпечними для оточуючого середовища. До таких стоків слід віднести стічні води заводів, на яких ці барвники виготовляють, а також стоки фарбувальних відділень різних промислових підприємств. За певними оцінками припускається, що втрата барвників в ході їх виробництва становить близько 1–2 %, а для активних барвників – 4 % від обсягу виготовлених. Ймовірно, дані втрати є наслідком розчинення барвників у воді, що використовувалась для їх синтезу, питома витрата за якою на деяких підприємствах сягає в середньому  $225 \text{ м}^3$  води на виробництво 1 т барвника. В текстильній же промисловості питома витрата води досягає  $400 \text{ м}^3$  на 1 т виготовленої продукції, відповідно, об'єм стічних вод зростає до  $50 \dots 400 \text{ м}^3$ . В залежності від класу барвника, виду текстильного матеріалу, що підлягає фарбуванню, до стічних вод переходить від 5 до 50 % вихідної кількості барвника. Тому і не дивно, що при скиданні відпрацьованих вод до водойм без очищення концентрація даних політантів значно перевищує гранично допустимі норми ( $0,05\text{--}0,25 \text{ мг/дм}^3$ ) [1]. Шкідливі речовини разом із стоками потрапляють у водойми, погіршують їх санітарний стан та викликають необхідність спеціального глибокого очищення води перед її використанням для господарсько-побутових та промислових потреб. Очищення промислових стічних вод відбувається на локальних або централізованих очисних спорудах, але вони не завжди можуть впоратись із задачею очищення води від даного виду політантів. Барвники характеризуються складною хімічною будовою і тому не підлягають біохімічній деструкції у водних системах. У зв'язку з цим пошук шляхів ефективного вилучення барвників зі стічної води є наразі актуальним.

## 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є стічні води, забруднені барвниками. Барвники утворюють багаточисельний клас органічних сполук, для яких характерною є наявність ненасичених зв'язків (хромофори), таких, як  $\text{—C=C—}$ ,  $\text{—N=N—}$  і  $\text{—C}\equiv\text{N—}$ , що відповідають за забарвлення, а також функціональних груп, що відповідають за їх фіксацію на матерії  $\text{—NH}$ ,  $\text{—OH}$ ,  $\text{—COOH}$  і  $\text{—SO}_3\text{H}$ . Світове виробництво текстильних матеріалів використовує активні барвники з високими колористичними характеристиками й стійкістю до фізико-хімічних і фізико-механічних показників. Тому, потрапляючи у довкілля, барвники легко забарвлюють воду і оточуюче середовище, тим самим створюючи несприятливе естетичне сприйняття, погіршуючи органолептичні властивості води. Крім того, барвники можуть також істотно впливати на здатність до фотосинтезу у мешканців водойм, зменшуючи інтенсивність проникання світла і можуть також бути токсичними для деяких водних видів флори і фауни за рахунок ароматичних кілець та хлорних замісників. Це може призвести до масової загибелі представників водного світу, порушення процесів самоочищення, санітарного стану водойми, важкого отруєння людини. Велика кількість стічних вод містить різноманітні барвники, які є токсичними та небезпечними для оточуючого середовища. До них слід віднести стічні води (СВ) заводів, на

яких ці барвники виготовляють, а також фарбувальних цехів різних промислових підприємств. Одним з найбільш проблемних місць є видалення барвників з розбавлених розчинів.

Бромкрезоловий зелений активно використовується у сучасній аналітичній хімії при кислотно-основному титруванні. Під час проведення хімічних досліджень можна спостерігати перехід забарвлення розчину від світло-жовтого до синього кольору з інтервалом рН від 3,8 до 5,4. Завдяки своїм відмінним хімічним властивостям такий реагент нерідко застосовується для точного визначення альбуміну у плазмі або сироватці.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою роботи* є дослідження закономірності видалення з модельних водних розчинів аніонних барвників методом флотоекстракції на прикладі барвника бромкрезолового зеленого.

Для реалізації мети поставлені наступні задачі:

1. Для барвника бромкрезоловий зелений підібрати поверхнево-активну речовину катіонного типу та флотоекстрагент.
2. Встановити оптимальні умови перебігу процесу.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Існуючі методи фізико-хімічного очищення стічних вод від барвників можна розділити на три основні групи.

Перша група методів забезпечує вилучення забруднень переведенням барвників у осад або флотошлам шляхом сорбції на пластівцях гідроксидів металів, що утворюються при реагентній обробці стічних вод (коагуляція, реагентна напірна флотація та ін.). До недоліків цієї групи можна віднести: невисокий ступінь очищення, особливо знебарвлення, необхідність утилізації осадів водоочищення та їх зневоднення.

Друга група включає сепаративні методи (сорбція на активному вугіллі і макропористих іонітах, зворотний осмос, ультрафільтрація та ін.). Ці методи забезпечують високий ступінь очищення стічних вод, однак вимагають попередньої механіко-хімічної обробки з метою видалення нерозчинних домішок, складні в апаратурному оформленні, мають високу собівартість очищення.

Третя група поєднує деструктивні методи, засновані на глибоких окисно-відновних перетвореннях, ініційованих різними фізико-хімічними процесами, зокрема дією окисників ( $O_2$ ,  $O_3$ ,  $Cl_2$ ,  $H_2O_2$ ), ультрафіолетового й сонячного випромінювання, метод Фентона. У більшості випадків при їх реалізації не утворюються осади, в оброблювану воду не вносяться додаткові забруднення у вигляді хлоридних, сульфатних і інших іонів, однак при реалізації цих методів відбувається безповоротна втрата цінних компонентів [1–3].

Усе це зумовлює необхідність розроблення та впровадження ефективних і водночас недорогих у виконанні та експлуатації технологій очищення стічних вод від барвників. Пошук нових, більш досконалих та економічно доцільних методів, що дають можливість не тільки видаляти барвники з стічних вод, а й

регенерувати дорогі компоненти, є одним з основних напрямків розвитку технології очищення стічних вод.

Флотоекстракція – технологія, що вперше була представлена як удосконалений метод іонної флотації, який виключає можливість піноутворення. Даний метод забезпечує одночасне розділення і концентрування і є ефективним при очищенні стічних вод від органічних та неорганічних поліютантів [4, 5]. Цей метод заснований на комбінації методів флотації і екстракції, базується на пропусканні газових бульбашок крізь водну фазу і винесенні речовини забрудника (сублату) в органічну фазу. При цьому органічна фаза повинна бути легшою, ніж водна, і не розчинятися в ній. В процесі флотоекстракції застосовуються поверхнево-активні речовини (ПАР), що відіграють роль збирачів. ПАР утворює з іонами важких металів в нерозчинні у воді гідрофобні сублати, які зв'язуються з бульбашками повітря і виносяться з водної фази в органічну. Оскільки процес флотоекстракції проводиться невеликий проміжок часу (15–20 хв.), органічна фаза, яка повинна незалежно від геометрії флотоекстракційної колонки мати товщину 7–10 мм, не встигає повністю вичерпати свою ємність як екстрагента. Тому, ефективність флотоекстракції не залежить від коефіцієнта розподілу. Сублат, сфлотована бульбашками речовина, може як розчинятися в органічному шарі, так і утворювати суспензію, яка утримується завдяки змочуванню [4, 5].

В роботі [6] досліджували селективну флотоекстракцію двох барвників, метилоранжу і родаміну Б з їхніх розбавлених розчинів при рН 10,5 та гексадецилтриметиламоній бромідом в якості ПАР. Як органічний розчинник використовувався ізооктанол. Коефіцієнт відділення метилоранжу від родаміну Б з еквімолярних водних розчинів бульбашками азоту з малою швидкістю потоку (5 мл/хв.) був дуже високий і становив 510.

В роботі [7] застосували іонну флотацію та флотоекстракцію для видалення іншого барвника – звичайного синього 1 із синтетичних стічних вод. Як ПАР було використано гексадецилтриметиламоній бромід, а як органічний розчинник – парафінову олію. Після 5 хв. флотоекстракції зі швидкістю подачі бульбашок газу 150 мл/хв. було видалено більше ніж 98 % барвника.

Автори [8] розглядали вилучення барвника бромфенолового синього з водного розчину при використанні гексадецилпіридиній хлориду в якості ПАР. Високий ступінь видалення барвника (більше 95 %) флотоекстракцією спостерігався через 10 хв., коли в якості органічного розчинника використовувався ізопентанол, а швидкість подачі газу була рівна 75 мл/хв.

В роботі [9] використовували додецилбензолсульфонат натрію для флотоекстракції барвника метилового фіолетового з водного розчину. Метилловий фіолетовий екстрагувався в ізопентанол. Найбільш ефективною для видалення цього барвника виявилась стехіометрична кількість ПАР (молярне співвідношення барвник: ПАР=1:1). Через 10 хв. флотоекстракції було видалено більше 97 % барвника.

В дослідженні [10] вивчали флотоекстракцію барвника бромкрезолового зеленого. В якості поверхнево-активної речовини було використано гексадецилпіридиній хлорид. Комплекс барвника з ПАР флотувався

бульбашками азоту та екстрагувався в органічну фазу – ізооктанол. Після 5 хв. барботування газу зі швидкістю 75 мл/хв., спостерігалось більше ніж 99 % вилучення бромкрезолового зеленого.

Останніми роками ведуться дослідження флотоекстракції як в Україні, так і за кордоном [11–14]. Отже, беручи до уваги згубний вплив барвників на флору і фауну та недосконалість існуючих технологій з їх вилучення, запропоновано метод флотоекстракції, як ефективну альтернативу. Незважаючи на минулі напрацювання вчених при вивченні даної технології, і досі залишається чимало нерозглянутих аспектів та суперечливих даних, що стосуються флотоекстракційного вилучення барвників, тому є доцільним подальше дослідження даної тематики.

## 5. Методи досліджень

Визначення ефективності видалення барвника вивчали в залежності від: типу органічного розчинника, вихідної концентрації барвника, молярного співвідношення ПАР:Барвник, рН вихідного розчину. В якості ПАР експериментально (з ряду відомих катіонних ПАР) було обрано гексадецилпіридиній хлорид. ПАР разом з барвником утворює гідрофобний комплекс, який взаємодіє з бульбашками газу і підіймається до границі розподілу фаз «вода – органічна сполука» і поглинається органічною фазою.

Процес флотоекстракції проводився у циліндричній скляній колонці діаметром 35 мм. Через пористу скляну перегородку подавалось повітря з компресору. Витрати газу контролювали ротаметром. Вихідна концентрація барвника 1–20 мг/дм<sup>3</sup>. Об'єм модельного розчину – 300 см<sup>3</sup>, об'єм органічної фази – 6–14 см<sup>3</sup>. Процес флотоекстракції відбувався до встановлення постійної залишкової концентрації барвника, яку визначали фотометричним методом на однопроменевому скануючому спектрофотометрі Portlab 501 (Великобританія). Корегування значення рН проводилося розчинами NaOH з концентрацією 0,1 моль/дм<sup>3</sup> та HCl з концентрацією 0,1 моль/дм<sup>3</sup> (рН водних розчинів вимірювався за допомогою рН-метра рН-150МИ).

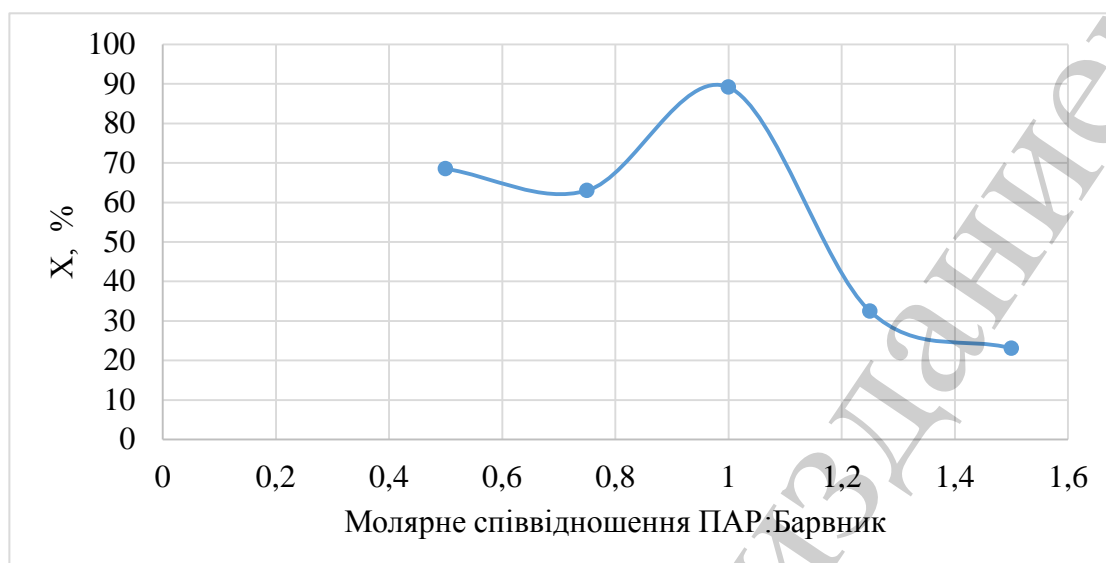
Мірою ефективності процесу флотоекстракції слугував показник ступеня вилучення барвника X, %.

## 6. Результати дослідження

Молекули ПАР беруть безпосередньо участь в утворенні сублату та впливають на ступінь вилучення, зменшуючи значення вільної поверхневої енергії на межі розподілу органічної та водної фаз, а також стабілізують поверхню бульбашок. В якості ПАР для бромкрезолового зеленого було обрано катіонний ПАР гексадецилпіридиній хлорид (ГПХ).

Як видно з графіку на рис. 1, найкращим молярним співвідношенням ПАР:Барвник є 1:1. При меншій концентрації поверхнево-активної речовини швидкість видалення була повільнішою і залишкова концентрація барвника більшою за рахунок неповного формування комплексу ПАР-барвник. Проте, коли співвідношення було більше, ніж 1:1, ступінь видалення також

зменшується через конкуренцію на поверхні пухирця надлишкових іонів ПАР з комплексом ПАР-барвник.

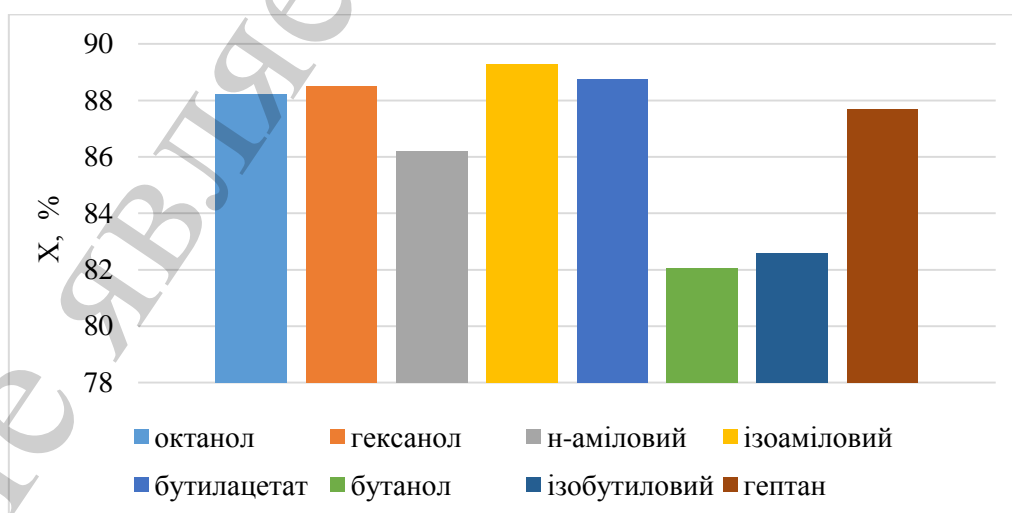


**Рис. 1.** Залежність ступеню вилучення барвника від молярного співвідношення ПАР:Барвник

При виборі органічної фази слід враховувати наступні особливості:

- органічна фаза повинна не змішуватися з водою;
- не повинна розчинятися у воді;
- проявляти здатність утримуватися на поверхні води й не утворювати емульсії;
- мати густину в межах  $0,75\text{--}0,90\text{ г/см}^3$ ;
- повинна бути нелеткою за кімнатної температури.

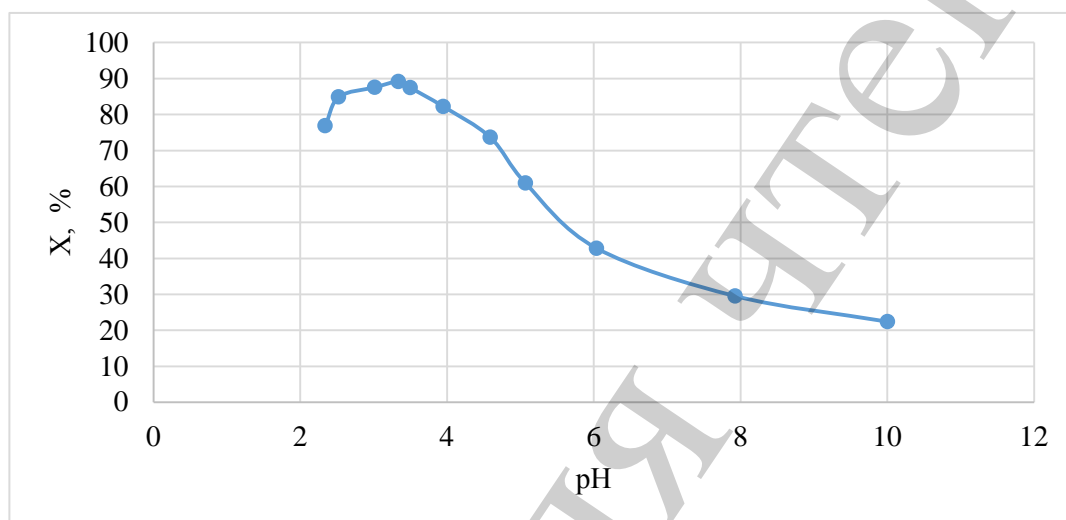
В загальному випадку, ефективність процесу тим вище, чим вище розчинність комплексу (Барвник-ПАР) в органічному розчиннику. В якості екстрагентів використовувались: октанол, гексанол, бутанол, н-аміловий, ізоаміловий, ізобутиловий спирти, бутилацетат, гептан (рис. 2).



**Рис. 2.** Залежність ефективності флотоекстракції від типу екстрагенту

Як видно з графіку на рис. 2, оптимальним екстрагентом є ізоаміловий спирт. При його використанні забезпечується ступінь видалення барвника – 89,3 %. Проте й інші екстрагенти, такі як октанол, гексанол, бутилацетат, забезпечили досить високий рівень видалення полютанту (88,2 %, 88,5 % та 88,8 %, відповідно).

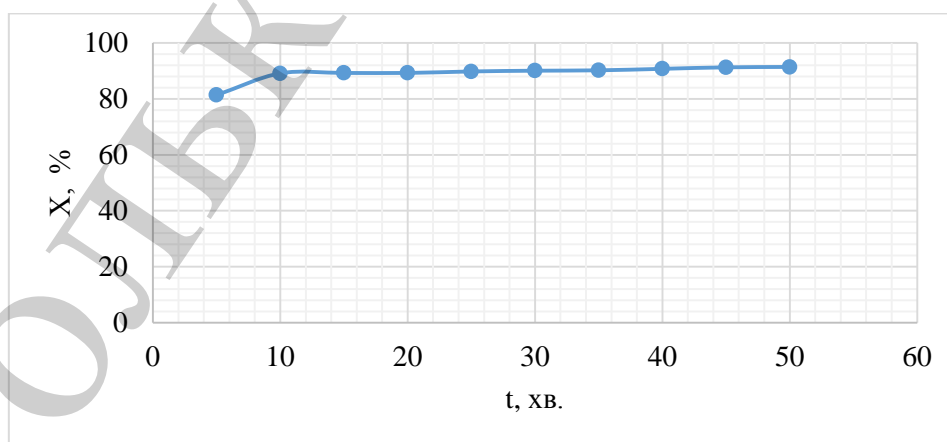
За різних значень рН ПАР та барвник можуть утворювати різні комплекси які мають різну гідрофобність та різну розчинність у органічній фазі. Встановлено (рис. 3), що ефективність видалення бромкрезолового зеленого досягала найбільшого значення в інтервалі рН 3–3,5 і становила 87,5–89 %.



**Рис. 3.** Залежність процесу флотоекстракції барвника від рН водної фази

При подальшому збільшенні рН (з 4 до 6) спостерігається стрімке падіння ступеню видалення барвника з 82 до 43 %. Наступне збільшення рН до значення 10 так само забезпечує зменшення ефективності видалення аж до 22 %.

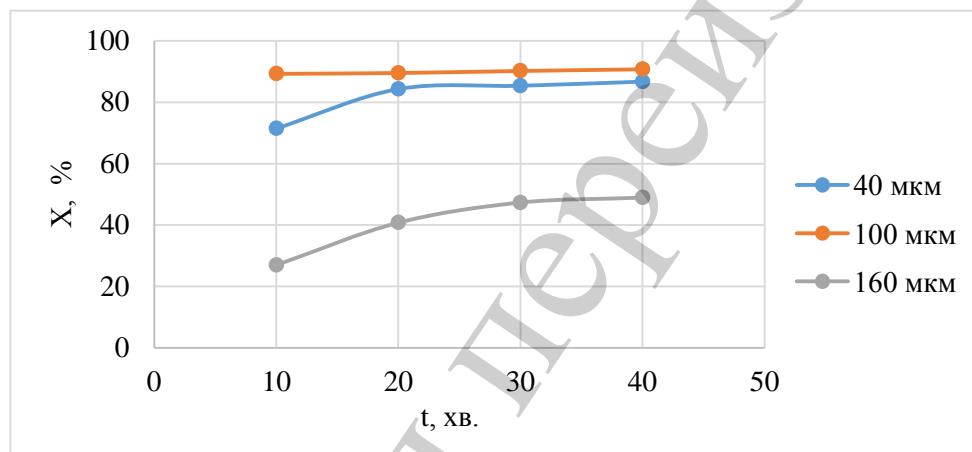
Досліджено ступінь видалення барвника бромкрезоловий зелений в залежності від тривалості процесу. Досліди проводились в інтервалі часу 5–50 хв. (рис. 4).



**Рис. 4.** Залежність ступеню видалення барвника від тривалості флотоекстрагування

Як видно з графіка на рис. 4, більше 80 % барвника видаляється за перші 5 хв. процесу. Рациональний час флотоекстракції для бромкрезолового зеленого становить 10 хв., що забезпечує 89 % видалення барвника з води. При подальшому проведенні процесу ступінь видалення незначно зростає.

Метод флотоекстракції вимагає бульбашок маленького розміру, ПАР та органічного розчинника. Моделі та експериментальні результати вказують на те, що радіус бульбашок є одним із ключових параметрів в процесі флотоекстракції. Діаметр бульбашок, що використовують на практиці, становить близько 100 мкм. Важливо відмітити, що це узгоджується з максимальним діаметром бульбашок для повного ламінарного режиму, що дорівнює 130 мкм [4]. Досліджувався процес видалення барвника в залежності від розміру пор фільтра Шотта і як наслідок розміру бульбашок, що утворюються під час проведення процесу. Досліджено вилучення барвника при використанні фільтрів із діаметром пор – 40, 100 та 160 мкм (рис. 5).

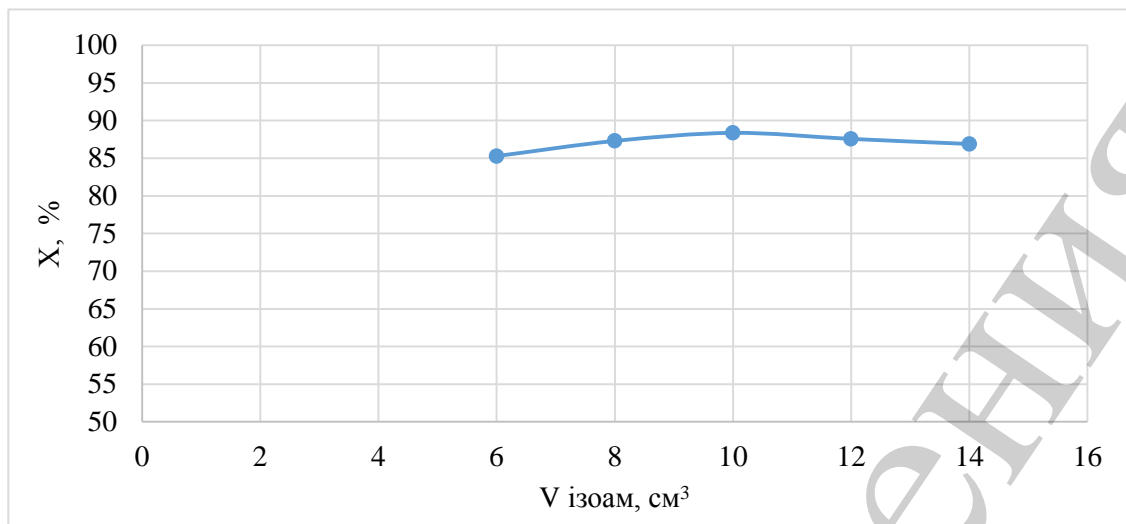


**Рис. 5.** Ефективність видалення барвника в залежності від розміру пор фільтра Шотта

Встановлено, що найефективніше видалення барвника забезпечується при використанні фільтру Шотта з діаметром пор 100 мкм.

У флотоекстракції об'єм органічної фази не має впливу на константу швидкості процесу. Це одна з найважливіших переваг флотоекстракції над екстракцією. Більша частина речовини переноситься з водної фази в органічну за рахунок бульбашок повітря, що перетинають границю розділу фаз, а не за рахунок дифузії речовини крізь неї. Тоді кількість перенесеної речовини повинна залежати тільки від кількості повітря, що перетинає границю розділу фаз, а не від кількості фаз. Але дуже важливо відмітити, що, коли об'єм органічної фази занадто малий, границя розділу фаз буде розриватися при навіть незначній витраті газу і процес втратить свою ефективність. Почнеться зворотне масоперенесення речовини з органічної фази у водну і об'єм органічної фази стане визначальним (рис. 6).





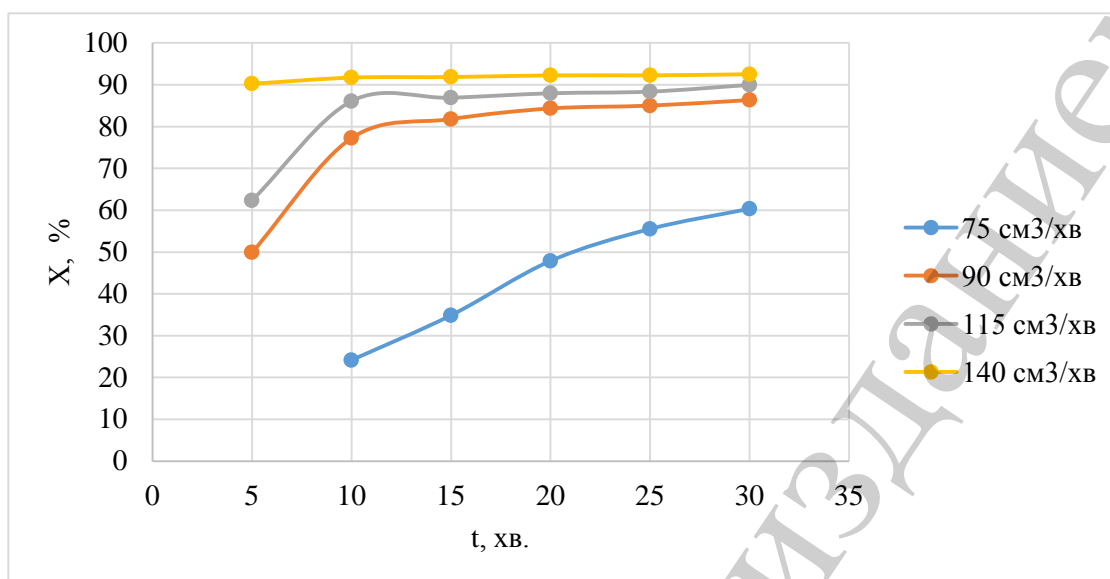
**Рис. 6.** Залежність ступеня видалення барвника від об'єму органічної фази

Отримані результати свідчать, що ефективність процесу флотоекстракції бромкрезолового зеленого досить слабо залежить від об'єму екстрагенту – ступінь вилучення змінюється в діапазоні 85,3...88,3 %. Найефективніше очищення досягнуто при використанні 10 см<sup>3</sup> ізоамілового спирту – 88,3 %, а найгірший результат спостерігається при об'ємі спирту 6 см<sup>3</sup> – 85,3 %.

Показником того, що швидкість газового потоку є важливим параметром в процесі флотоекстракції, є збільшення константи швидкості процесу при збільшенні швидкості потоку в межах менше 80 см<sup>3</sup>/хв. Однак ця залежність не є лінійною при більших значеннях. При великих швидкостях барботажу на поверхні розчину може виникати турбулізація, що призводить до ризику виникнення солубілізації [2]. Швидкість подачі газу повинна бути значно меншою, ніж у звичайній йонній флотації. Це необхідно для того, щоб не розривався шар органічного розчинника. Небажаним є прорив великої кількості піни через цей шар. Якщо швидкість подачі газу надто велика, деяка частина піни може проходити через шар розчинника і утворювати над ним пінний шар. Також можливо, що збільшення швидкості газу призводить до збільшення радіусу бульбашок. Це зменшує площу поверхні на одиницю об'єму газу і тривалість перебування бульбашок у водній фазі, так як більші бульбашки володіють більшими силами підйому. Але, незважаючи на це, встановлено, що зростання швидкості потоку повітря через колонку покращує інтенсивність процесу флотоекстракції, але тільки тоді, коли розміри бульбашок залишаються малими.

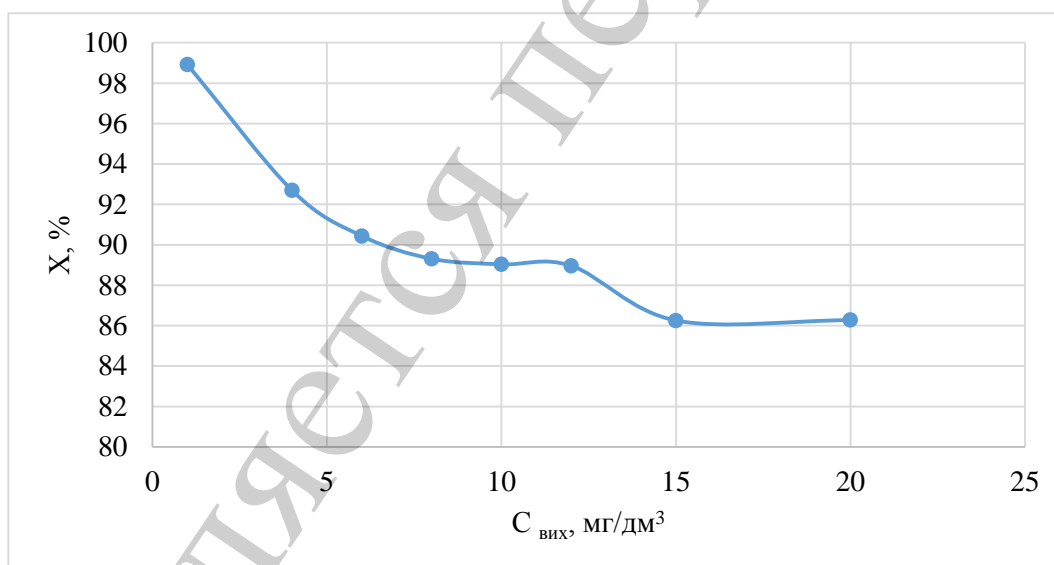
Досліджено залежність ефективності видалення бромкрезолового зеленого від витрати повітря в діапазоні 75...140 см<sup>3</sup>/хв (рис. 7). Виявлено, що найефективніше вилучення барвника спостерігається при витраті повітря 140 см<sup>3</sup>/хв. і становить 91,7 % за 10 хв. Проте така інтенсивність газового потоку, як і її подальше збільшення, спричиняє незначний розрив органічної фази, що може призвести до повторного забруднення очищеної води. Тому більш раціонально проводити процес при витраті повітря в межах 110–120 см<sup>3</sup>/хв. Це забезпечує високий ступінь очищення (до 90 %) і не спричинює

руйнування шару екстрагенту, а отже, виключає можливість повторного забруднення води.



**Рис. 7.** Вплив витрати газу на ступінь вилучення барвника

Вивчено вплив на ефективність флотоекстракції бромкрезолового зеленого вихідної концентрації барвника (рис. 8).



**Рис. 8.** Залежність ефективності очищення від вихідної концентрації барвника

Як видно з рис. 8, зменшення концентрації вихідної речовини забезпечує збільшення ступеня видалення барвника, і навпаки. Так, при вихідній концентрації бромкрезолового зеленого  $1 \text{ мг/дм}^3$  забезпечується очищення до 99 %, а при концентрації  $20 \text{ мг/дм}^3$  ступінь очищення знижується до 86 %.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Процес флотоекстракції має наступні основні переваги:

- активна речовина виноситься бульбашками газу і надходить у верхній шар гідрофобної рідини без змішування фаз. Таким чином, процес розділення забезпечує суттєву селективність, потенційно більшу, ніж інші флотаційні процеси. Окрім того, при флотоекстракції не досягається стан рівноваги в основній частині системи, а лише на границі розділу водної й органічної фаз, оскільки процес масоперенесення сильно підсилюється бульбашковим масопереносом. Відтак, процес флотоекстракції не лімітується константою рівноваги, в результаті ефективність вилучення слідових кількостей поллютантів може теоретично досягати 100 %;
- ступінь вилучення в процесі флотоекстракції не залежить від відношення об'ємів водної та органічної фаз;
- відсутність змішування фаз, тобто утворення емульсії в цьому випадку майже неможливе, виняток становить утворення емульсії води в органічному розчиннику, однак така емульсія не є стійкою;
- простота технологічного оформлення процесу: немає жорстких режимів контролю температур або тисків, обладнання просте у виконанні, відсутні рухомі деталі;
- речовина, що видаляється, знаходиться в органічній фазі, що досить полегшує її подальшу переробку.

*Weaknesses.* Основними недоліками методу є низька продуктивність у порівнянні з флотацією за рахунок невеликої витрати газу, яка не руйнує верхнього шару органічної рідини в розподільчому апараті. Однак це твердження в деяких випадках є спірним, тому що на відміну від процесу флотації, сублат у процесі флотоекстракції може миттєво екстрагуватися й розчинитися в шарі рідини, що не змішується з водою. Це дозволяє використовувати більші витрати газу. Також збільшення продуктивності відбувається за рахунок зменшення розміру бульбашок газу, що може бути досягнуто, наприклад, при використанні в процесі флотоекстракції принципу напірної флотації.

Негативний вплив перемішування у процесі флотоекстракції частково полегшує конструкцію апаратів. Крім того речовина, що вилучається, не обов'язково повинна добре розчинятися в органічному розчиннику, досить і просто доброї змочуваності.

*Opportunities.* Запропонований метод забезпечує достатній рівень очищення стічних вод від барвників. Він також може бути застосований в системах локального очищення стоків з наступним поверненням води у технологічний процес. Це забезпечить зниження витрат на споживання водних ресурсів, скидання стічних вод у водні об'єкти, а також обмежить потрапляння шкідливих речовин у навколишнє середовище. Особливості флотоекстракції дозволяють регенерувати екстрагент та ПАР.

*Threats.* Труднощі впровадження у промисловості запропонованого методу пов'язані з відсутністю методики вибору флотореагенту. Для максимально ефективного вилучення поллютантів необхідно вірно підібрати ПАР. Крім того,

асортимент ПАР обмежений і вартість буває досить високою. Раціональні умови процесу дозволяють підвищити ефективність флотоекстракції та зменшити витрату ПАР.

## 8. Висновки

1. Для флотоекстракції барвника бромкрезолового зеленого в інтервалі концентрацій 2–20 мг/дм<sup>3</sup> з водних розчинів експериментально підібрано поверхнево-активну речовину катіонного типу – гексадецилпіридиній хлорид і флотоекстрагент – ізоаміловий спирт.

2. Встановлено раціональні умови видалення барвника: рН 3–3,5, молярне співвідношення бромкрезоловий зелений – гексадецилпіридиній хлорид = 1:1. Найефективніше видалення барвника забезпечується при використанні фільтру Шотта з діаметром пор 100 мкм, витраті повітря 110–120 см<sup>3</sup>/хв., тривалості процесу 10 хв. За цих умов ступінь видалення барвника складає 88–99 %. Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого методу для ефективного видалення барвників з низькоконцентрованих водних розчинів.

## Література

1. Nesterova L. A., Saribekov G. S. Efficiency of Use of Turnaround Systems of Water Consumption at the Textile Enterprises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2010. Vol. 4, No. 8 (46). P. 25–28. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3022> (Last accessed: 10.03.2018).

2. Forgacs E., Cserha T., Oros G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review // Environment International. 2004. Vol. 30, No. 7. P. 953–971. doi:[10.1016/j.envint.2004.02.001](https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001)

3. Leskiv H. Z. Ochyshchennia stichnykh vod vid barvnykiv shliakhom adsorbtsii na pryrodnykh dyspersnykh sorbentakh: Abstract's PhD thesis. Lviv: Natsionalnyi universytet «Lvivska politehnika», 2008. 20 p.

4. Lu Y., Zhu X. Solvent sublation: theory and application // Separation & Purification Reviews. 2001. Vol. 30, No. 2. P. 157–189. doi:[10.1081/spm-100108158](https://doi.org/10.1081/spm-100108158)

5. Bi P., Dong H., Don, J. The recent progress of solvent sublation // Journal of Chromatography A. 2010. Vol. 1217, No. 16. P. 2716–2725. doi:[10.1016/j.chroma.2009.11.020](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.020)

6. Caragay A. B., Karger B. L. Use of rate phenomena in solvent sublation separation of methyl orange and rhodamine B // Analytical Chemistry. 1966. Vol. 38, No. 4. P. 652–654. doi:[10.1021/ac60236a040](https://doi.org/10.1021/ac60236a040)

7. Horng J. Y., Huang S. D. Removal of organic dye (direct blue) from synthetic wastewater by adsorptive bubble separation techniques // Environmental Science & Technology. 1993. Vol. 27, No. 6. P. 1169–1175. doi:[10.1021/es00043a017](https://doi.org/10.1021/es00043a017)

8. Lu Y., Wang Y., Zhu X. The removal of bromophenol blue from water by solvent sublation // Separation Science and Technology. 2001. Vol. 36, No. 16. P. 3763–3776. doi:[10.1081/ss-100108361](https://doi.org/10.1081/ss-100108361)

9. Lu Y., Zhu X., Peng Y. The removal of methyl violet from water by solvent sublation // Separation Science and Technology. 2003. Vol. 38, No. 6. P. 1385–1398. doi:[10.1081/ss-120018815](https://doi.org/10.1081/ss-120018815)

10. Studies on the removal of bromocresol green from water by solvent sublation / Lu Y. et al. // Separation Science and Technology. 2007. Vol. 42, No. 8. P. 1901–1911. doi:[10.1080/01496390601174398](https://doi.org/10.1080/01496390601174398)

11. The kinetics and thermodynamics of surfactants in solvent sublation / Lu Y. et al. // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. 2001. Vol. 370, No. 8. P. 1071–1076. doi:[10.1007/s002160100914](https://doi.org/10.1007/s002160100914)

12. Wastewater treatment from toxic metals by flotoextraction / Obushenko T. I. et al. // Journal of Water Chemistry and Technology. 2008. Vol. 30, No. 4. P. 241–245. doi:[10.3103/s1063455x08040073](https://doi.org/10.3103/s1063455x08040073)

13. Teoretychni zasady ta praktychne zastosuvannia flotoekstraktsyy: ohliad / Astrelin I. M. et al. // Voda i vodoochysni tekhnolohii. 2013. No. 3. P. 3–23.

14. Thermodynamic Studies of Bromphenol Blue Removal from Water Using Solvent Sublation / Obushenko T. et al. // Chemistry & Chemical Technology. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 515–518. doi:[10.23939/chcht10.04.515](https://doi.org/10.23939/chcht10.04.515)

ТОЛЬКО ДЛЯ