

DOI 10.15589/jnn20160316

УДК 54–128.4

H40

THE PHYSICAL AND CHEMICAL LAWS OF ADSORPTIVE VERMICULITE CLEANING OF WASTE WATER BY CATIONIC SURFACTANTS

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ АДСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВЕРМИКУЛІТОМ СТІЧНИХ ВОД ВІД КАТІОННИХ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Oleksandr H. Nevynskiy
oleksandr.nevynskii@nuos.edu.ua
ORCID:—

Tsvietana R. Yashchenko
yashchenko.tsv@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0000-0257

О. Г. Невинський,
канд. техн. наук, доц.

Ц. Р. Ященко,
асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The search for effective methods of treating waste water technology solutions and wastewater plants and industrial plants, containing cationic surfactants (CS) is discussed. The aim is to study the physical and chemical adsorption patterns of expanded vermiculite CS that chlorides are primary alkylamines; study patterns of this process on an industrial scale; development and optimization technologies of expanded vermiculite as adsorbent CS from dilute solutions. The adsorption isotherm CS vermiculite kinetics of the process and the impact on it of various factors, including temperature, pH, electrolyte concentration and so on was experimental studied. Studies have shown the effectiveness of the use of expanded vermiculite as adsorbent CS of aqueous solutions. Based on definitions of basic thermodynamic characteristics of adsorption process (including a maximum specific absorption, adsorption constants distribution, ΔF_0 , ΔN_0 , ΔS_0 etc.) made technological design process. The technology of purification (refining) of waste water by adsorption CS expanded vermiculite ensures their level of removal to the maximum permissible concentration, which makes it possible to use them to fuel recycling of industrial water supply.

Keywords: expanded vermiculite; cationic surfactants; the adsorption isotherm; adsorption purification; wastewater; the purification technology.

Анотація. Вивчені фізико-хімічних закономірності адсорбції спученим вермикулітом стічних вод від катіонних поверхнево-активних речовин. Експериментально дослідженні ізотерми адсорбції КПАР вермикулітом, кінетика цього процесу та характер впливу на нього різноманітних чинників. Проведені дослідження показали ефективність використання спученого вермикуліту як адсорбенту КПАР із водних розчинів. Розроблена технологія очищення (доочищення) стічних вод від КПАР.

Ключові слова: спучений вермикуліт; катіонні поверхнево-активні речовини; ізотерми адсорбції; адсорбційне очищення; стічні води; технологія очищення.

Аннотация. Изучены физико-химические закономерности адсорбции вспученным вермикулитом сточных вод от катионных поверхностно-активных веществ. Экспериментально исследованы изотермы адсорбции КПАВ вермикулитом, кинетика этого процесса и характер влияния на него различных факторов. Проведенные исследования показали эффективность использования вспученного вермикулита в качестве адсорбента КПАВ из водных растворов. Разработана технология очистки сточных вод от КПАВ.

Ключевые слова: вспученный вермикулит; катионные поверхностно-активные вещества; изотермы адсорбции; адсорбционная очистка; сточные воды; технология очистки.

REFERENCES

- [1] Abramzon A. A., Zaychenko L. P., Fayngold S. I. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Sintez, analiz, svoystva, primeneniye* [Surfactants. Synthesis, analysis, properties and application]. Lviv, Khimiya Publ., 1988. 200 p.
- [2] Akhtyamov R. Ya. *Vermikulit Ukrainy* [Ukrainian vermiculite]. *Stroitelnye materialy i konstruksii* [Building materials and constructions]. Kiev, Budivelnik Publ., 1991, issue 2. pp. 14–15.
- [3] Belov P. S. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Svoystva, tekhnologiya, primeneniye* [Surfactants. The properties, technology, application]. Moscow, VZPI Publ., 1992. 171 p.
- [4] Bilonoga Yu. L., Maksisko O. R. *Zmina hidromekhanichnykh i teplofizychnykh kharakterystyk teplonosii v pryhranychnomu shari pid diieiu poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn* [Changing hydromechanical and thermal characteristics of the coolant in the near-boundary layer under surfactants]. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia — Integrated technologies and energy saving*, 2009, no 2., pp. 121–126.
- [5] Gemmerling, G. V. *Vermikulit (Proizvodstvo i primeneniye)* [Vermiculite (production and use)]. Chelyabinsk, Uralniistromproekt Publ., 1988, 146 p.
- [6] Gudzenko T. V., Volyuvach O. V., Belyaeva T. O., Gorshkova O. V., Puzirova I. V., Ivanitsya V. O. *Vydaleniya bromidu heksadetsylpirydyiniiu iz vodnykh rozchyniv bakteriiamy rodu Pseudomonas za yikh vzaiemodii z hlynystym materialom ta khitozonom* [Removing heksadetsylpirydyinyu bromide with aqueous solutions by the bacteria of the genus Pseudomonas by their interaction with clay material and chitosan]. *Mikrobiolohiia i biotekhnolohiia — Microbiology and Biotechnolog*, 2014, issue 1, pp. 72–78.
- [7] DSTU 3812-98. *Okhorona dovkillia ta ratsionalne povodzhennia z resursamy. Kontrol operatyvnykh stichnykh vod ochysnykh sporud mist i promyslovykh pidpriemstv. Zahalni polozhennia* [Environmental protection and sustainable management of resources. Control operational sewage treatment plant cities and industrial enterprises]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1999. 6 p.
- [8] Lure Yu.Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennykh stochnykh vod* [Analytical chemistry of industrial waste water]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 447 p.
- [9] Nevynskiy O. H. *Adsorbtsiinyi metod ochyshchennia stichnykh vod vermykulitom* [Absorbent wastewater treatment vermiculite]. *Problemy ekolohii ta enerhozberezhennia u sudnobuduvanni. Materialy VII mizhnarodnoi nauk-tekhn. konferentsii* [Environmental issues and energy saving in shipbuilding. Proceedings of the 7th International Scientific Conference]. Mykolaiv, NUK Publ., 2012, pp. 110–113.
- [10] Streltsova O. O., Voliuvach O. V., Puzyriova I. V., Yegortseva V. O. *Sposib ochystky vody vid kationnykh poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn* [The method of water treatment cationic surfactants]. Patent UA, no. 95593A, 2011.
- [11] Sviridov V. V., Sviridov A. V., Nikiforov A. F. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov mikroflotatsii* [Physical and chemical bases of the microflotation processes]. Ekaterinburg, GOU VPO UGLTU-UI Publ., 2006. 578 p.
- [12] Tarasevich Y. I. *Prirodnye sorbenty v protsessakh ochistki vody* [Natural sorbents in the water treating processes]. Kiev, Naukva dumka Publ., 1981. 208 p.
- [13] Kholmberg K., Yensson B., Kronberg B., Lindman B. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva i polimery v vodnykh rastvorakh* [Surfactants and polymers in aqueous solutions]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 528 p.
- [14] Eytel V. *Fizicheskaya khimiya silikatov* [Physical chemistry of silicates]. Moscow, Foreign Literature Publishing House, 1962. 1055 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Катионні поверхнево-активні речовини (КПАВ) широко використовуються у лакофарбовій, паперовій, текстильній промисловостях (як змочувачі, дис-

пергатори, емульгатори), у металургії (для змащення прокатних станів), у нафтодобувній галузі (для гідрофобізації привибійної зони пласта), у теплоенергетиці (для обробки функціональних поверхонь сис-

тем теплопостачання тощо) а також у інших галузях [1, 3]. Наприклад, згідно [4] при додаванні до теплоносіїв незначної кількості (0,05...0,10 мас. % КПАР) коефіцієнт теплопередачі теплообмінників збільшується майже на чверть при сталому гідравлічному опорі.

Поширення виробництва та масштабів застосування КПАР призводить до забруднення ними відкритих водойм і ставить на порядок денний питання вибору ефективного методу очищення відпрацьованих технологічних водних розчинів і стічних вод (далі по тексту — водних розчинів) виробництв і промислових підприємств.

МЕТОЮ РОБОТИ є вивчення фізико-хімічних закономірностей адсорбції спученим вермикулітом КПАР, що є хлоридами первинних алкіламінів з вмістом від 10 до 16 атомів Карбону (які є базовою складовою найбільш поширених катіонних ПАР); вивчення закономірностей здійснення цього процесу в промисловому масштабі; розробка та оптимізація технології використання спученого вермикуліту як адсорбенту КПАР (із розбавлених розчинів із вмістом основної речовини до 100 мг/л і насичених — до 1000 мг/л).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Із даних літератури відомо [13], що вміст КПАР у вихідних стічних водах, що досліджувались, залежно від виду виробництва здебільшого коливається в межах від 5 до 100 мг/л, в окремих випадках сягає 1000 мг/л.

На сьогодні досить ефективними методами видалення КПАР із водних розчинів вважаються флотаційні методи (флотофлокуляційний, флотосорбційний тощо), що забезпечують 85...90%-ий ступінь очищення при вихідній концентрації ~ 100 мг/л. Однак впровадження флотаційного методу спряжене з проблемою механічного збирання утвореного пінного продукту, або використання додаткових реагентів для суттєвого зменшення його об'єму [11].

Із спеціальних методів очищення водних розчинів від КПАР сорбційний метод є найпростішим у здійсненні, енергозощаджувальним, менш вартісним при використанні природних доступних, дешевих і екологічно безпечних сорбентів (активоване вугілля, цеоліт, хітозан тощо) [6, 10, 12].

На основі результатів комплексу пошукових експериментальних робіт [9] авторами було доведено ефективність застосування спученого вермикуліту як природного мінерального сорбенту для очищення стічних вод, що має надзвичайно розвинену поверхню шаруватої структури [5] і, відповідно, підвищену іонообмінну і сорбційну здатність щодо ПАР, водорозчинних полімерів тощо.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для проведення досліджень було застосовано:

– хлориди первинних алкіламінів — децил-, додецил- і гексадециламіну (марки ХЧ), а також АНП-2, що є сумішшю хлоридів первинних аліфатичних амінів з вмістом від 10 до 18 атомів Карбону і з середньою молекулярною масою 261,5;

– вермикуліт спучений (ГОСТ 12865-67) середньої фракції (лінійний розмір частинок 1,2...2,5 мм), виготовлений вітчизняним виробником із концентрату Ковдорського родовища (Росія).

Слід зазначити, що Україна має великі запаси вермикулітової сировини [2], зосередженої у кількох родовищах із сприятливими гідрогеологічними умовами для їхньої розробки. Це робить перспективним створення своєї вермикулітової промисловості, але на даний час роботи у цьому напрямку не здійснюються. Тому у даних дослідженнях використовувався імпортований концентрат.

Згідно Ейтеля [14] для вермикуліту — мінералу з групи гідроліод, здатного спучуватися при нагріванні, характерна шарувата пакетна структура: два елементарних шари силіційоксигенових тетраедрів і шар між ними, що складається з гідратованих іонів магнію, феруму та алюмінію, утворюють міцно зв'язаний слоюаний пакет. У результаті того, що певна кількість іонів Si^{4+} в тетрадрах заміщена на іони Al^{3+} , кожен пакет набуває надлишкового негативного заряду, що зрівноважується катіонами K^+ , розташованими між пакетами. Загальна формула вермикуліту може бути записана так: $K_{0,3-0,5}(Mg, Fe, Al)_{2,8-3} \cdot (H_2O)_{3-5} [(Si, Al)_4O_{10}]$. У спученому стані подібна структура є передумовою іонообмінної і сорбційної здатності щодо КПАР.

Методика проведення дослідів була наступною. Модельні вихідні розчини КПАР концентрацією 100 мг/л, що є меншою за критичну концентрацію міцелоутворювання відповідних КПАР [1], готували шляхом розчинення наважки 0,1 г КПАР у 1 л дистильованої води за температури 45 °С. В подальшому розчини набували кімнатної температури, а під час дослідження їх термостатували до температури досліду. Ці розчини використовували у дослідах по визначенню впливу різноманітних факторів. Для побудови ізотерм адсорбції використовували розчини як меншої, так і більшої концентрації. Останні помітно опалесціювали, що може вказувати на те, що певна частина солей знаходилась у колоїдному стані.

Значення рН розчинів встановлювали за допомогою 0,1 н розчинів HCl і NaOH, сорбцію КПАР (крім спеціального досліду) здійснювали у слабко лужному середовищі (рН = 8).

У скляну колбу ємністю 250 мл вносили 100 мл водного розчину КПАР. До колби додавали 100 мг сорбенту-спученого вермикуліту. Колбу закривали добре притертим скляним корком і струшували на

протязі 30 хвилин, цього часу достатньо для встановлення адсорбційної рівноваги (рис. 1).

Використаний сорбент відфільтровували через фільтрувальний папір, фільтрат відділяли в окрему колбу. Залишкову рівноважну концентрацію КПАР в обробленій воді визначали калориметрично за стандартною методикою [8].

Ступінь видалення КПАР з води розраховували за рівнянням:

$$A = [(C_0 - C_p) / C_0] \cdot 100\%,$$

де C_0 і C_p — вихідна і залишкова рівноважна концентрації КПАР у воді, відповідно

Достовірність відмінностей між середніми значеннями визначали за критерієм Стьюдента на рівні значимості не менше 95% ($p \leq 0,05$). Обробку даних здійснювали за допомогою програми Excel.

Результати досліджень. Проведені дослідження показали ефективність використання спученого вермикуліту як адсорбенту КПАР із водних розчинів.

Ступінь очищення води через 10 хвилин експозиції (рис. 1) сягав від 67% для децил- та додециламіну і до 88% для гексадециламіну. Збільшення експозиції до 30...35 хвилин приводило до збільшення ступеню видалення, відповідно, на 15...10%. Оптимальний час одностадійної сорбційної обробки води складає 30 хвилин. Але, слід зазначити, що до досягнення стану, коли залишкова концентрація КПАР у водному розчині не перебільшуватиме 0,5 мг/л, що відповідає нормативним вимогам [7], необхідна кілька стадійна обробка.

Ізотерми сорбції хлоридів первинних алкіламінів вермикулітом мають складний S-подібний характер (рис. 2), який обумовлений, вочевидь, з однієї сторони, полімолекулярним характером адсорбції, а з іншої — неоднорідністю розчинів адсорбата (наявніс-

тв у них міцелярно-розчинених солей амінів).

Збільшення температури розчинів від 20 до 60 °С не змінює характеру ізотерм адсорбції, хоч певною мірою зменшує їх величини. Це підтверджує гіпотезу про фізичний характер процесу.

У початковій стадії ізотерми адсорбції відповідають рівнянню Ленгмюра:

$$\frac{C_p}{G} = \frac{1}{G_\infty \beta} + \frac{C_p}{G_\infty},$$

де C_p — рівноважна концентрація солі аміну в розчині; β — константа; G_∞ — максимальна питома адсорбція при заповненні всієї поверхні сорбента молекулами сорбованої речовини; G — адсорбція, яка відповідає рівноважній залишковій концентрації C_p .

Це дозволило по отриманим експериментальним даним визначити β і G_∞ , а також розрахувати основні термодинамічні характеристики процесу ΔF^0 , ΔH^0 , ΔS^0 :

$$\Delta F^0 = -RT \ln K;$$

$$\Delta H^0 = RT^2 \cdot d \ln K / dT;$$

$$\Delta S^0 = (\Delta H^0 - \Delta F^0) / T.$$

В наведених рівняннях ΔF^0 , ΔH^0 і ΔS^0 — стандартні диференційні зміни вільної енергії, ентропії та ентальпії системи при температурі T ; K — константа адсорбційного розподілу; $d \ln K / dT$ — величина, що визначається шляхом графічного диференціювання залежності $\ln K$ від $1/T$.

Значення величин G_∞ , ΔF^0 , ΔH^0 , ΔS^0 для адсорбції досліджуваних солей первинних аліфатичних амінів спученим вермикулітом, що отримані із ізотерм адсорбції, наведені в таблиці

Суттєвий вплив на адсорбцію КПАР спученим вермикулітом здійснює концентрація катіонів гідрогену у водному середовищі. Як видно із рис. 3, при

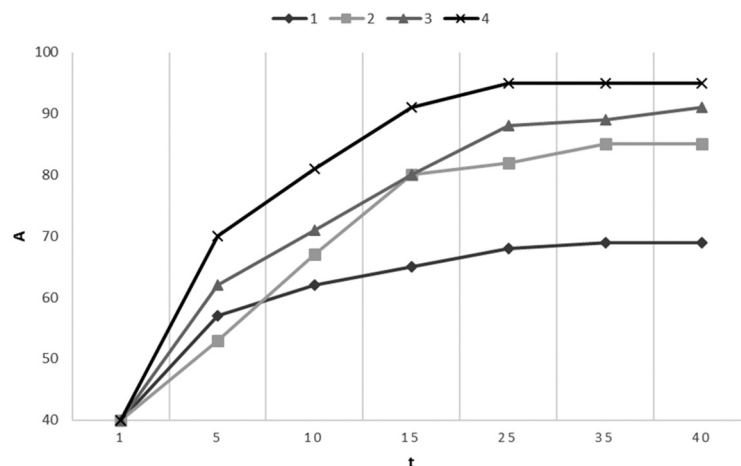


Рис. 1. Кінетика адсорбції КПАР спученим вермикулітом:

A — ступінь видалення КПАР (%); τ — час (хв.)

Хлориди: 1 — децил-; 2 — додецил-; 3 — АНП-2; 4 — гексадециламінін

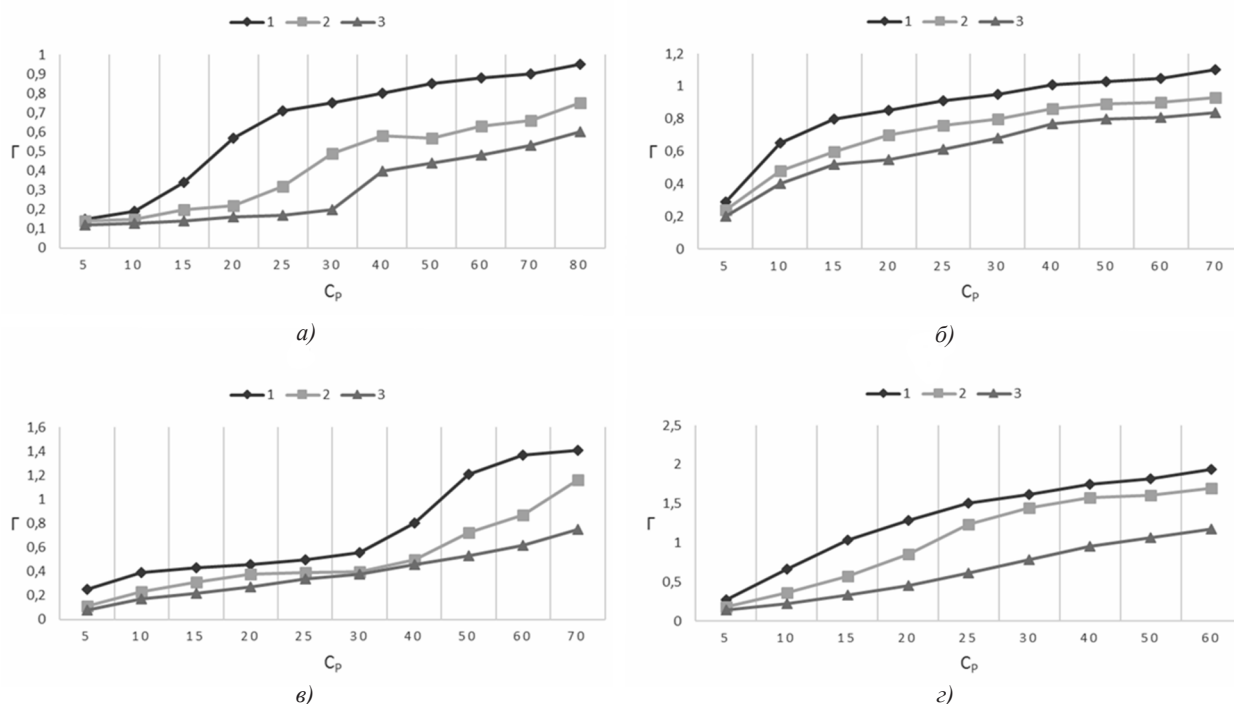


Рис. 2. Ізотерми адсорбції хлоридів: децил- (а), додецил- (б), АНП-2 (е) і гексадециламіну (з) спученим вермикулітом: Γ — адсорбція (ммоль/л); C_p — концентрація розчину (мг/л) Температура (°C): 1 — 20; 2 — 40; 3 — 60

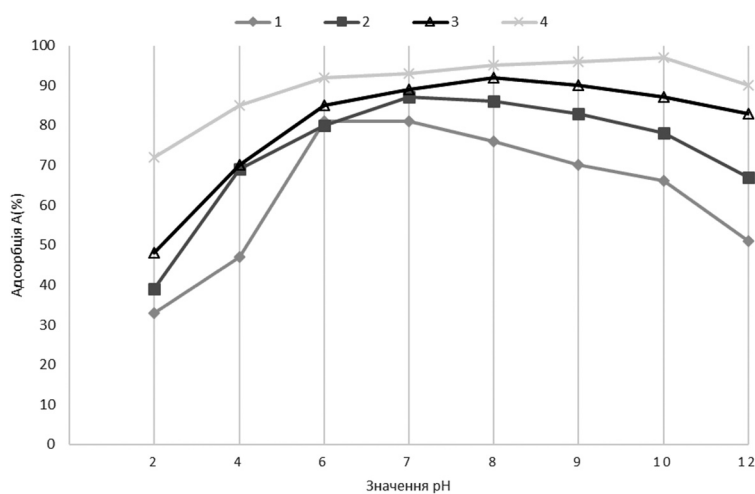


Рис. 3. Вплив концентрації катіонів гідрогену (pH) на адсорбцію А (%) спученим вермикулітом хлоридів: 1 — децил-; 2 — додецил-; 3 — АНП-2; 4 — гексадециламіну

Таблиця 1. Вплив природи солі аміну на значення величин Γ_{∞} , ΔF^0 , ΔH^0 , ΔS^0

Сіль аміну	T , К	Γ_{∞} , ммоль/Г	K , Г/ммоль	ΔF^0 , кДж/моль	ΔH^0 , кДж/моль	$T\Delta S^0$, кДж/моль
$C_{10}H_{21}NH_3Cl$	293	0,30	1089,3	-33,4	-16,4	-17,0
	313	0,25	559,5	-34,3		-17,7
	333	0,23	458,1	-36,0		-19,6
$C_{12}H_{25}NH_3Cl$	293	0,41	1301,1	-34,7	-14,7	-20,0
	313	0,37	1057,2	-35,9		-21,2
	333	0,33	995,6	-37,6		-22,9
$C_{16}H_{33}NH_3Cl$	293	1,51	2575,3	-35,9	-17,2	-18,7
	313	1,37	1965,7	-37,6		-20,4
	333	1,16	1139,2	-38,5		-21,3

зміні значення рН розчинів від 2 до 12 адсорбція збільшується, вочевидь, за рахунок переходу частини адсорбату із розчинного стану в колоїдно-розчинний (міцелярний).

Величина рН, що є оптимальною для адсорбції КПАР сплученим вермикулітом, визначається за виведеною емпіричною формулою:

$$\text{pH}_{\text{opt}} = \text{pK} + 3,$$

де pK — від’ємний логарифм константи іонізації відповідної органічної основи.

Додавання до розчинів хлоридів алкіламінів невеликих кількостей (від 0,2 до 2 ммоль/л) електролітів, таких як KCl , CaCl_2 і AlCl_3 несуттєво збільшує їх адсорбцію вермикулітом, що може бути пов’язано з впливом електролітів на величину заряду поверхні адсорбента та ступінь дисоціації іоногенних груп адсорбату.

На підставі визначених основних термодинамічних характеристик процесу адсорбції (зокрема максимальної питомої адсорбції, констант адсорбційного розподілу, ΔF^0 , ΔH^0 , ΔS^0 тощо здійснено технологічне конструювання процесу.

Запропонований адсорбційний метод призначений для глибокого очищення стічних вод (або доочищення біологічно очищених вод, в особливості у тих випадках, коли очищені стічні води використовуються для підживлення систем промислового оборотного водозабезпечення) від катіонних ПАР (у принципі, також від катіонних барвників, певних неіонногенних ПАР та водорозчинних полімерів).

Згідно запропонованої технології зерна сплученого вермикуліту, який є адсорбентом, застосовуються у вигляді нерухливого ущільненого шару, через який воду, що підлягає очищенню, пропускають знизу вверх.

В адсорбері шар зерен вермикуліту укладається на опорну безпровальну решітку із отворами 5...10 мм і шагом 10...20 мм, на яку попередньо за-

вантажені шарами дрібний щебінь та гравій висотою 400...500 мм, які виконують роль підтримуючого шару та розподіляють потік рідини дренажу. Зверху адсорбент покривається шарами гравію та щебеню, розміщеними у зворотному порядку, і затискується другою опірною решіткою.

Стічні води перед подачею в колону адсорбера з щільним шаром адсорбенту звільняються від грубодисперсних речовин фільтруванням.

Адсорбційна колона працює як установка періодичної дії до проскоку у фільтрат катіонного ПАР у концентрації, що перевищує гранично допустиму, після чого її зупиняють на регенерацію. Є доцільним використання блоку із трьох колон. При цьому одна з колон знаходиться на регенерації, а інші дві працюють послідовно. На регенерацію виводять першу по ходу води колону, а колону з регенованим сорбентом підключають останньою по ходу води. Схема блоку із трьох адсорбційних колон наведена на рис. 4.

Параметри робочої зони та характеристики перебігу процесу очищення у колоні з щільним нерухомим шаром для потреб конкретного виробництва розраховуються за рівнянням:

$$L_p = \frac{m(i)}{S\beta\Delta C_c},$$

де L_p — довжина працюючої зони, м; $m(i)$ — кількість розчиненої ПАР, адсорбованої за одиницю часу, г/год.; S — площа перетину шару у колоні, м²; β — коефіцієнт масопередачі (взятий із дослідних даних для подібного гідродинамічного режиму); ΔC_c — середня рушійна сила процесу, г/м³.

$$\Delta C_c = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{\ln \frac{\Delta C_1}{\Delta C_2}}, \quad \Delta C_c = \Delta C_i - \Delta C_p,$$

де ΔC_1 та ΔC_2 — рушійні сили процесу на вході та на виході із шару адсорбенту; ΔC_i — концентрація в по-

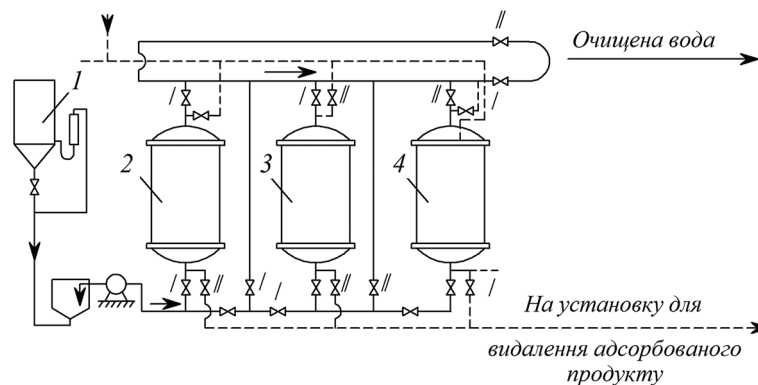


Рис. 4. Схема блока адсорбційних колон:

1 — ємність з реагентом для регулювання рН стічних вод перед подаванням на очищення; 2, 3, 4 — колони з вермикулітом; I — кран відкритий; II — кран закритий

тоці на момент часу t ; ΔC_p — концентрація в стані адсорбційної рівноваги.

Швидкість переміщення працюючої зони (u , м/год) вздовж нерухомого шару вермикуліту у процесі роботи адсорбційної колони та тривалість роботи шару адсорбенту до проскоку забруднення у фільтрат (θ , год.) знаходимо за формулами:

$$u \approx \frac{C_0 \omega}{a_0}, \quad \theta = K(L - L_p),$$

де C_0 — концентрація хлориду алкіламіну в стічній воді на вході у колону, г/м³; ω — швидкість фільтрування рідини, м/год.; a_0 — динамічна питома адсорбція шару адсорбенту, г/м³; K — коефіцієнт захисної дії.

У залежності від природи хлориду алкіламіну адсорбцію здійснюють в області рН = 7,5...9,0.

У зв'язку з тим, що із підвищенням температури адсорбція зменшується і водночас прискорюється досягнення адсорбційної рівноваги, технологічний процес бажано здійснювати за умов, наближених до стандартних (298 К).

Швидкість фільтрування стічних вод через щільний шар вермикуліту слід підтримувати в межах від

2...3 до 5...6 м³/(м² · год.) в залежності від концентрації забруднень у воді і висоти шару адсорбенту в колоні.

ВИСНОВКИ. У статті вивчено вплив на перебіг процесу основних факторів: концентрації адсорбату в розчині, значення рН середовища, гранулометричного складу адсорбенту, наявності електролітів тощо. Дослідженні фізико-хімічні закономірності адсорбційного очищення спученим вермикулітом стічних вод від катіонних поверхнево-активних речовин, а саме при зміні значення рН розчинів від 2 до 12 адсорбція збільшується, зміна температури розчинів в межах від 20 до 60 °С майже не змінює характеру ізотерм адсорбції. Доведено високу ефективність методу очищення водних розчинів від КПАР. Визначені основні термодинамічні характеристики процесу адсорбції (зокрема максимальна питома адсорбція, константа адсорбційного розподілу, ΔG^0 , ΔH^0 , ΔS^0 тощо), необхідні для технологічного конструювання процесу. Розроблена технологія очищення (доочищення) стічних вод від КПАР адсорбцією спученим вермикулітом дозволяє забезпечити рівень їх очищення до ГДК, що робить можливим їх використання для підживлення систем промислового оборотного водо-забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Абрамзон, А. А.** Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение [Текст] / А. А. Абрамзон, Л. П. Зайченко, С. И. Файнгольд: Учеб. пособие для вузов. — Л.: Химия, 1988. — 200 с.
- [2] **Ахтямов, Р. Я.** Вермикулит Украины [Текст] / Р. Я. Ахтямов // Строительные материалы и конструкции. — К.: Будівельник. — 1991. — № 2. — С. 14–15.
- [3] **Белов, П. С.** Поверхностно-активные вещества. Свойства, технология, применение [Текст]. — М.: ВЗПИ, 1992. — 171 с.
- [4] **Білонога, Ю. Л.** Зміна гідромеханічних і теплофізичних характеристик теплоносія в приграничному шарі під дією поверхнево-активних речовин (ПАР) [Текст] / Ю. Л. Білонога, О. Р. Максисько // Інтегровані технології та енергозбереження. — 2009. — № 2. — С. 121–126.
- [5] **Геммерлинг, Г. В.** Вермикулит (Производство и применение): сб. науч. тр. Урал. н.-и. и проект. ин-т стоим. материалов [Текст] / [под ред. Г. В. Геммерлинга] — Челябинск: Уралнистромпроект, 1988. — 146 с.
- [6] **Гудзенко, Т. В.** Видалення броміду гексадецилпіридинію із водних розчинів бактеріями роду *Pseudomonas* за їх взаємодії з глинистим матеріалом та хітозаном [Текст] / О. В. Волювач, Т. О. Беляєва, О. В. Горшкова, І. В. Пузирьова, В. О. Іваниця // Мікробіологія і біотехнологія. — 2014, № 1. — С. 72–78.
- [7] Державний стандарт України ДСТУ 3812-98. Охорона довкілля та раціональне поводження з ресурсами. Контроль оперативних стічних вод очисних споруд міст і промислових підприємств. Загальні положення. — Надано чинності 1999-07-01. — К.: Держстандарт України, 1999. — 6 с.
- [8] **Лурье, Ю. Ю.** Аналитическая химия промышленных сточных вод [Текст]. — М.: Химия, 1984. — 447 с.
- [9] **Невинський, О. Г.** Адсорбційний метод очищення стічних вод вермикулітом [Текст] // Проблеми екології та енергозбереження у суднобудуванні. Матеріали VII міжнародної наук-техн. конференції. — Миколаїв: НУК, 2012. — С. 110–113.
- [10] Пат. України на винахід № 95593А. Спосіб очистки води від катіонних поверхнево-активних речовин / Стрельцова О. О., Волювач О. В., Пузирьова І. В., Єгорцева В. О. — Опубл.: 10.08.2011. Бюл. № 15/2011.
- [11] **Свиридов, В. В.** Физико-химические основы процессов микрофлотации [Текст] / А. В. Свиридов, А. Ф. Никифоров. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГЛТУ-УПИ, 2006. — 578 с.
- [12] **Тарасевич, Ю. И.** Природные сорбенты в процессах очистки воды [Текст]. — К.: Наукова думка, 1981. — 208 с.
- [13] **Холмберг, К.** Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах [Текст] / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг, Б. Линдман. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. — 528 с.
- [14] **Эйтель, В.** Физическая химия силикатов [Текст]. — М.: Из-во иностр. лит., 1962. — 1055 с.

© О. Г. Невинський, Ц. Р. Яценко

Надійшла до редколегії 08.08.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. *М. Ю. Харитонов*