

УДК 628.16.081.3

Кіро С.А.¹, Абрамова Н.М.¹, Грідяєв В.В.^{1,2}, Хома Р.Є.^{1,3}

¹Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини МОН України та НАН України, м. Одеса. E-mail: eksvar@ukr.net

²Національний “Дніпровська політехніка” пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005

³Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65082

Імпрегнований волокнистий хемосорбент аміаку на основі лимонної кислоти. Прогнозування захисних характеристик

Досліджено вплив відносної вологості (RH) газоповітряного середовища на хемосорбцію аміаку імпрегнованим волокнистим хемосорбентом (ІВХС), який одержували просоченням нетканого голкопробивного матеріалу з поліефірних волокон водним розчином лимонної кислоти (40 мас. %) з модифікаторами (гліцерин, хлорид натрію та етанол) для рівномірного розподілу хемосорбенту на поверхні волокон і підвищення адгезії до складу просочувального розчину. Показано, що вихідні криві проскоку аміаку через нерухомий шар ІВХС $c_{np}(t_{np})$ в координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} при всіх значеннях відносної вологості з достовірністю $R^2 \geq 0.95$ апроксимуються прямими лініями і для кількісного опису системи аміак-ІВХС можна застосувати теоретичну модель Уїлера-Джонаса. Зіставленням експериментальних і теоретичних кривих $c_{np}(t_{np})$ в координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} визначено невідомі модельні параметри: константу швидкості хемосорбції і сорбційну ємність одиниці маси ІВХС та їх залежності від відносної вологості газоповітряного середовища (ГПС). Встановлено, що сорбційна ємність ІВХС лінійно зростає із збільшенням RH , а константа швидкості хемосорбції системаміаак-ІВХС не залежить від відносної вологості ГПС і складає 3600 хв^{-1} . Експериментально досліджено вплив відносної вологості ГПС і товщини шару на час захисної дії ІВХС щодо аміаку та обґрунтовано адекватність застосування моделі Уїлера-Джонаса для прогнозування ресурсу ІВХС для умов реального використання.

Ключові слова: імпрегнований волокнистий хемосорбент, протигазові фільтри, аміак, динамічна сорбція, математична модель адсорбції, вихідні криві проскоку, константа швидкості хемосорбції, сорбційна ємність, час захисної дії.

Вступ. У хімічній промисловості аміак широко використовується при виробництві мінеральних добрив, азотної кислоти, вибухових речовин, як основний газ-охолоджувач у холодильних установках і відноситься до одного з найпоширеніших забруднювачів повітря [1]. У зв'язку з цим проблема очищення повітря та промислових викидів в атмосферу, а також захист органів дихання робітників від аміаку є дуже актуальною.

При очищенні технологічних газів та в засобах індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) використовують хемосорбенти аміаку на основі активованого вугілля (АВ), імпрегнованого солями 3d-металів (CuSO_4 , CuCl_2 , NiCl_2 , ZnCl_2 тощо), здатних утворювати комплексні сполуки з аміаком [2, 3], а також імпрегновані волокнисті хемосорбенти (ІВХС), які поглинають аміак за рахунок реакцій соле- або комплексоутворення [4, 5]. На відміну від гранульованих хемосорбентів на основі АВ, ІВХС мають низку переваг[4]. Волокна діаметром

10-30 мкм забезпечують рівнодоступність всіх функціональних груп на їх поверхні (сорбційна рівновага встановлюється дуже швидко) та незначний опір фільтруючого шару. Це дозволяє використовувати ІВХС при виготовленні проти-газових елементів для спорядження газоочищувального обладнання, в тому числі ЗІЗОД. Для оцінки впливу різних конструкцій та/або матеріалів, ранжування активності хемосорбентів необхідно розробити процедуру прогнозування ресурсу ІВХС в умовах реального використання.

Для АВ процедура прогнозування полягає у визначенні кореляції між сорбційними характеристиками фільтра (сорбційної ємності та швидкості сорбції) та швидкістю фільтрації, концентрацією адсорбтива, температурою та відносною вологістю газоповітряного середовища (ГПС) з використанням експериментальних вихідних кривих проскоку, отриманих у лабораторних умовах. Основою для прогнозування є аналітична модель, що описує концентраційні криві проскоку адсорбтива через нерухомий шар АВ, яка використовується для екстраполяції лабораторних результатів на реальні ситуації [6]. Найбільш широке застосування для різних адсорбційних систем з АВ отримала модель Уїлера-Джонаса [7, 8] завдяки її простоті та легкодоступним макроскопічним параметрам. Хоча рівняння Уїлера-Джонаса було отримано для розрахунку часу захисної дії при адсорбції органічної пари [7, 8], його застосування доведено і при хемосорбції АВ неорганічних газів кислої та основної природи: ціановодню, хлорціану, хлору та аміаку [9, 10].

Мета роботи – на прикладі дослідження впливу відносної вологості ГПС на час захисної дії та сорбційні характеристики ІВХС на основі лимонної кислоти щодо аміаку, обґрунтувати можливість та процедуру застосування рівняння Уїлера-Джонаса для прогнозування ресурсу ІВХС для умов реального використання.

Рівняння Уїлера-Джонаса. Для нерухомого шару АВ рівняння Уїлера-Джонаса для часу проскоку t_{np} (проміжок часу протягом якого концентрація адсорбтива в потоку на виході з шару стане рівною c_{np} при концентрації адсорбтива перед шаром c_0) зазвичай записують [7-11]:

$$t_{np} = \frac{M \cdot q_0}{Q \cdot c_0} - \frac{\rho \cdot q_0}{k_v \cdot c_0} \ln \left(\frac{c_0}{c_{np}} - 1 \right), \quad (1)$$

де t_{np} – час проскоку (хв); $M = \rho \cdot S \cdot H$ – маса шару (г), $Q = U \cdot S$ – об'ємна швидкість фільтрації ГПС ($\text{м}^3/\text{хв}$); c_0 – концентрація адсорбтива у ГПС ($\text{мг}/\text{м}^3$); q_0 – сорбційна ємність одиниці маси шару, рівноважна концентрації адсорбтива c_0 ($\text{мг}/\text{г}$); ρ – об'ємна щільність шару АВ ($\text{г}/\text{м}^3$); k_v – константа швидкості адсорбції (хв^{-1}); c_{np} – концентрація адсорбтива у ГПС на виході з шару при проскоку ($\text{мг}/\text{м}^3$); H – товщина шару АВ (м); S – площа поперечного перерізу шару (м^2); U – швидкість фільтрації ГПС ($\text{м}/\text{хв}$).

Особливістю рівняння (1) є лінійна залежність часу проскоку t_{np} від $\ln(c_0/c_{np} - 1)$ і симетричність кривої проскоку $c_{np}(H, t_{np})$, що неявно визнача-

ється рівнянням (1), щодо точки $c_{np} = 0.5 \cdot c_0$. Отже, можливість застосування моделі Уїлера-Джонаса для опису поведінки системи адсорбтив - шар ІВХС можна оцінити за експериментальною залежністю t_{np} від $\ln(c_0/c_{np} - 1)$. Якщо модель точно характеризує експериментальні дані, то цей графік буде прямою лінією з нахилом $\rho q_0/k_v c_0$ і перетином $M \cdot q_0/Q \cdot c_0$, і методом апроксимації можна визначити невідомі характеристики системи адсорбтив- шар ІВХС q_0 і k_v .

Модель Уїлера-Джонаса описує фронт адсорбції всередині шару [11], і крива проскоку $c_{np}(H, t_{np})$ є лише окремим випадком фронту адсорбції $c(z, t)$ на виході з шару $z = H$, де z – осьова координата у шарі (м). Фронт адсорбції при $z \leq H$ визначається рівнянням:

$$t = \frac{\rho \cdot q_0}{c_0} \left[\frac{z}{U} - \frac{1}{k_v} \ln \left(\frac{c_0}{c} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

де c – локальна концентрація адсорбтива в момент часу t в точці z .

Позначимо проміжок часу протягом якого концентрація адсорбтива на виході з шару стане рівною $0.5 \cdot c_0$ при концентрації адсорбтива перед шаром c_0 через $t_{0.5}$, тоді $q_0 = t_{0.5} \cdot Q \cdot c_0 / M$. За експериментальним значенням $t_{0.5}$ можна оцінити максимальну ємність (W , мг) шару адсорбенту маси M щодо адсорбтива,

$$W = q_0 \cdot M = t_{0.5} \cdot Q \cdot c_0. \quad (3)$$

Для режиму паралельного перенесення симетричного фронту адсорбції, що переміщується з постійною швидкістю u_ϕ , по кривій проскоку можна також оцінити ширину зони масопередачі - ділянки шару адсорбенту шириною L , в якому відбувається падіння концентрації адсорбтиву в потоці від початкової ($\sim 0.95 \cdot c_0, z_{0.95}$) до близької до нульової концентрації ($\sim 0.05 \cdot c_0, z_{0.05}$):

$$L = |z_{0.95} - z_{0.05}| = u_\phi (t_{0.95} - t_{0.05}).$$

Враховуючи, що $H = u_\phi \cdot t_{0.5}$ і $t_{0.95} + t_{0.05} = 2 \cdot t_{0.5}$, для оцінювання ширини зони масопередачі L отримаємо рівняння:

$$L = 2 \cdot H \cdot \frac{t_{0.95} - t_{0.05}}{t_{0.95} + t_{0.05}} = 2 \cdot \frac{U}{k_v} \cdot \ln \left(\frac{0.95}{0.05} \right). \quad (4)$$

Як видно, ширина зони масопередачі лінійно збільшується зі зростанням швидкості фільтрації U (витратою ГПС Q) та зменшується зі збільшенням значення константи швидкості адсорбції k_v .

Таким чином, у моделі Уїлера-Джонаса для прогнозування ефективності системи адсорбтив-адсорбент, поряд з q_0 і k_v використовуються лише макроскопічні параметри: маса і геометричні розміри шару адсорбенту, швидкість фільтрації та концентрація адсорбтива у ГПС. Для розрахунку часу захисної дії (ресурсу протигазового фільтра) в умовах реального використання дані щодо характеристик адсорбтива, типу адсорбенту та фізичних властивостей шару не

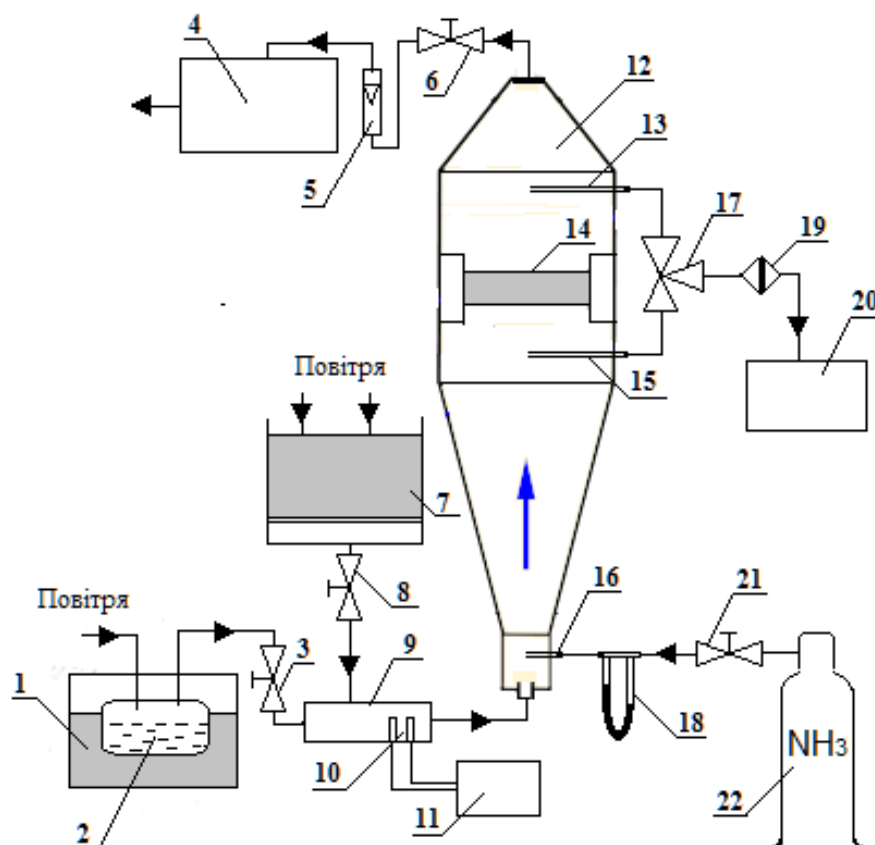


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки: 1 – термостат; 2 – зволожувач повітря; 3, 6, 8, 21 – регулюючі вентилі; 4 – аспіратор; 5 – ротаметр; 7 – осушувач повітря із силікагелем; 9 – змішувач сухого та вологого повітря; 10 – датчики вологості та температури; 11 – термометр-гігрометр ТА218С; 12 – випробувальна камера; 13, 15 – пробовідбірні трубки; 14 – адаптер шару ІВХС; 16 – трубка подачі NH_3 у змішувач; 17 – кран 3-ходовий; 18 – реометр; 19 – протиаерозольний фільтр; 20 – газоаналізатор Коліон-1В/ NH_3 ; 22 – балон NH_3 .

потрібні. Параметрами, що включають особливості експлуатації системи адсорбтив-адсорбент, наприклад, впливу вологості ГПС, є q_0 і k_v .

Методика експерименту. Принципову схему експериментальної установки наведено на рис.1.

ІВХС виготовляли шляхом просочення нетканого голкопробивного матеріалу з лавсанових волокон з поверхневою щільністю 400 г/м^2 водним розчином лимонної кислоти (40 мас.%) кваліфікації “хч”. Адсорбційна здатність матеріалу-носія щодо аміаку та його гідрофільність практично дорівнює нулю. Для рівномірного розподілу хемосорбенту ($\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$) на поверхні лавсанових волокон і підвищення адгезії до складу просочувального розчину вводили модифікатори: гліцерин, хлорид натрію та етанол, як рекомендовано у [5]. Після віджиму з ІВХС виготовляли диски і висушували їх до постійної маси при 80°C . Відношення мас хемосорбенту та волокнистого носія у складі ІВХС становило 1.1 ± 0.1 .

В адаптер випробувальної камери герметично встановлювали два диски, при цьому товщина фільтруючого шару ІВХС становила $H = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, площа

поперечного перерізу – $S = 41.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, об'ємна щільність шару ІВХС – $\rho = 0.257 \cdot 10^6 \text{ г/м}^3$. У процесі випробувань швидкість фільтрації ГПС становила $U = 3.63 \text{ м/хв}$ ($Q = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$), і є типовою для протигазових фільтрів.

Температуру та відносну вологість ГПС (RH) регулювали співвідношенням сухого та вологого повітря, що надходять у змішувач 9, і контролювали за допомогою термометра-гігрометра ТА218С з виносними датчиками. Абсолютна похибка вимірювань RH не перевищувала $\pm 5\%$. Для забезпечення відповідності вологонасиченості шару ІВХС умовам експерименту (за температурою та відотною вологістю ГПС) перед кожним вимірюванням проводили кондиціонування фільтруючого шару протягом 1 години при витраті ГПС $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ (температура $18 \pm 1^\circ\text{C}$ і RH у діапазоні $20 - 70\%$).

Визначення кривих проскоку аміаку через нерухомий шар ІВХС проводили при концентрації NH_3 в ГПС $c_0 = 700 \text{ мг/м}^3$ і її сталість контролювали реометром 18. Для вимірювання c_0 і c_{np} використовували калібрований по NH_3 газоаналізатор безперервної дії "Коліон-1В/ NH_3 " з фотоіонізаційним детектором [12]. Відносна похибка вимірювання у діапазоні концентрацій аміаку $0 - 2000 \text{ мг/м}^3$ не перевищувала $\pm 15\%$. Для відбору проб ГПС з об'ємною швидкістю $0.36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ використовували скляний пробовідбірник з тefлоновими сполучними трубками (PTFE 4/2). Час встановлення показань газоаналізатора на рівні 90% від значення вимірюваної концентрації не перевищував 1 хв, тому вимірювання залежності концентрації проскоку c_{np} від часу t_{np} проводили з частотою 1 хв^{-1} .

Результати експерименту та їх обговорення. Типові криві проскоку аміаку через шар ІВХС при різних значеннях відносної вологості ГПС представлені на рис. 2а. Ці ж експериментальні дані в координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} показані на рис. 2б. Як видно, експериментальні дані в координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} при всіх значеннях відносної вологості з достовірністю $R^2 \geq 0.95$ апроксимуються прямими лініями – $t_{np} = A - B \cdot \ln(c_0/c - 1)$ і, отже, рівняння (1) може бути використано для опису кривих проскоку при хемосорбції аміаку ІВХС. Для умов експерименту результати розрахунку параметрів A та B лінійних апроксимацій кривих проскоку методом найменших квадратів наведено у табл. 1. Також були розраховані значення q_0 , k_v , W , u_ϕ і L (наведені в табл. 1) в залежності від відносної вологості ГПС.

Одержані результати показують, що сорбційна ємність одиниці маси шару ІВХС q_0 суттєво зростає із збільшенням відносної вологості ГПС RH .

У той же час константи швидкості хемосорбції k_v при різних RH мають близькі значення, що знаходяться у інтервалі $3500 - 3700 \text{ хв}^{-1}$ і середнє лінійне відхилення величин не перевищує 3%. Тому середнє значення константи швидкості хемосорбції $\bar{k}_v = 3600 \text{ хв}^{-1}$ може бути використане для прогнозування часу захисної дії ІВХС щодо аміаку в умовах реального використання

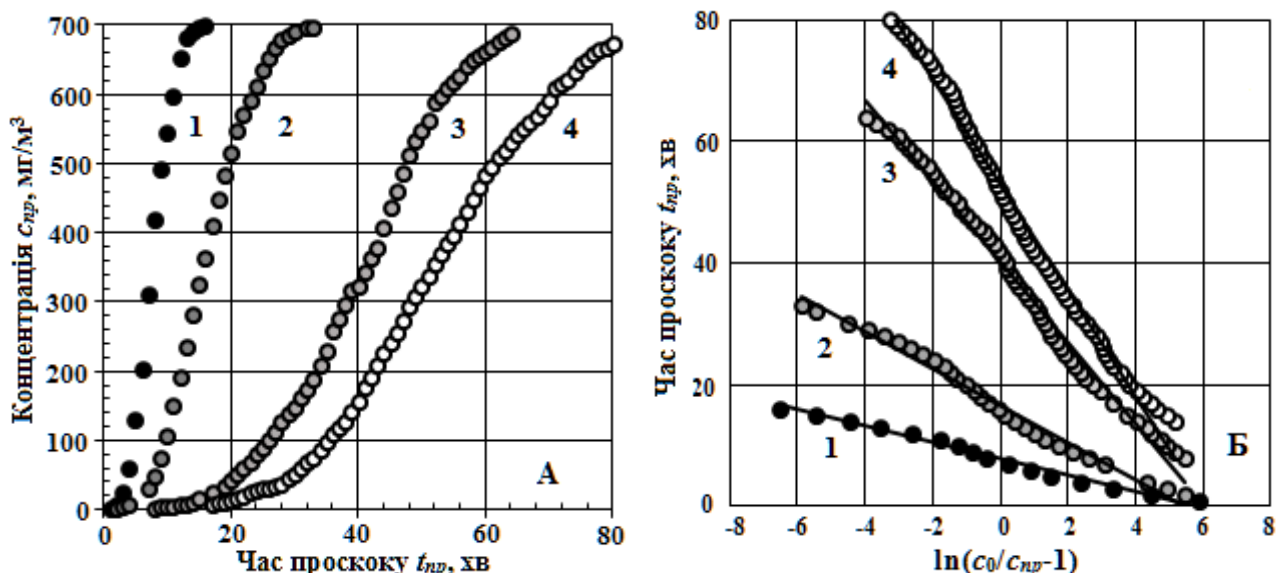


Рис. 2. Криві просоку аміаку через шар ІВХС для різних значень відносної вологості ГПС: А – залежність $c_{np}(t_{np})$, Б – залежність $t_{np} [\ln(c_0/c_{np} - 1)]$.

1 - $RH=20\%$; 2 - $RH = 30 \%$; 3 - $RH = 47 \%$; 4 - $RH = 62 \%$.

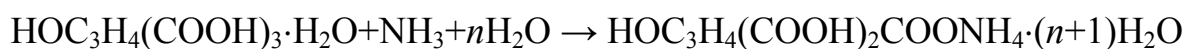
Таблиця 1. Величини параметрів та апроксимуючих прямих та розраховані значення параметрів q_0, k_v, W, u_ϕ і L адсорбційного процесу.

$RH, \%$	$A, \text{хв}$	$B, \text{хв}$	$q_0, \text{мг/г}$	$k_v, \text{хв}^{-1}$	$W, \text{мг}$	$u_\phi, \text{мм/хв}$	$L, \text{мм}$
20	7.80	1.34	13	3500	80	0.77	6.1
30	16.70	2.90	28	3500	180	0.36	6.1
40	30.26	5.21	50	3500	320	0.20	6.1
47	40.26	6.64	66	3700	420	0.15	5.8
49	37.62	6.40	62	3600	400	0.16	6.0
57	45.51	7.42	75	3700	480	0.13	5.8
57	46.98	7.65	77	3700	490	0.13	5.7
62	52.78	8.68	87	3700	550	0.11	5.8
70	57.88	9.60	95	3600	610	0.10	5.9

Залежність $q_0(RH)$ з достовірністю $R^2 \geq 0.98$ апроксимується прямою лінією (рис.3):

$$q_0(RH) = 1,7 \cdot RH - 20,1 \text{ мг/г}, \text{ (RH виражено у \%)} \quad (5)$$

Отримані результати показують, що необхідною умовою хемосорбції аміаку є наявність попередньо адсорбованої вологи (лимонна кислота гігроскопічна) у шарі ІВХС. В результаті хемосорбції NH_3 утворюються гідрати дигідроцитрату амонію [5]:



Як і слід очікувати (див. рівняння (4)), ширина зони масопередачі (працююча ділянка шару ІВХС) не залежить від відносної вологості ГПС та по порядку величини складає $L \approx H$. При цьому швидкість переміщення фронту адсорб-

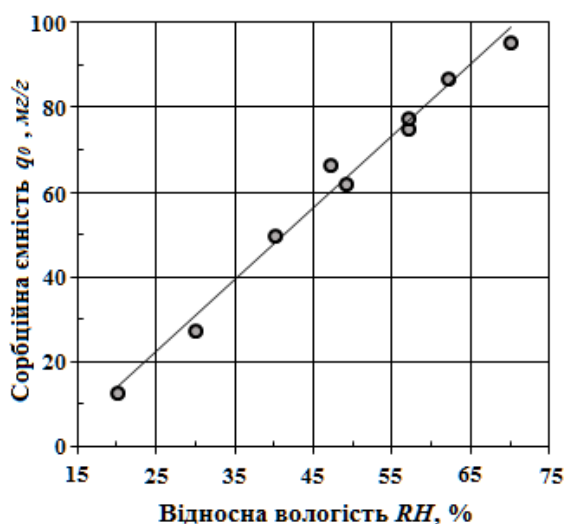


Рис. 3. Залежність сорбційної ємності ІВХС (q_0) від відносної вологості ГПС (RH): точки – обробка результатів експерименту за рівнянням (1); суцільна лінія – лінійна апроксимація (рівняння (5)).

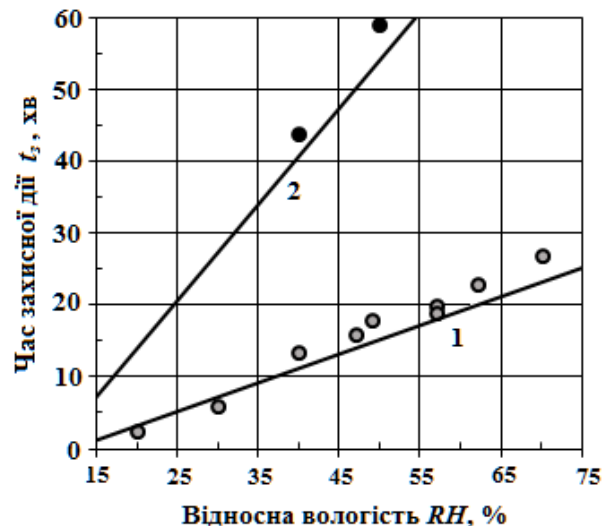


Рис. 4. Залежність часу захисної дії ІВХС (t_3) від відносної вологості ГПС RH . Експеримент: \circ – $H = 6$ мм; \bullet – $H = 12$ мм. Розрахунок: 1 – $H = 6$ мм; 2 – $H = 12$ мм.

ції u_ϕ у режимі паралельного перенесення зменшується від 0.77 мм/хв до 0.1 мм/хв зі збільшенням RH у діапазоні 20–70%. Слід зазначити, що оцінки u_ϕ і L має більш якісний характер, ніж кількісний, оскільки режим паралельного перенесення фронту адсорбції з постійною швидкістю є асимптотичним, якщо $H \gg L$.

Ресурс протигазових фільтрів 1 класу захисту по аміаку (К1) визначають за мінімальним часом захисної дії t_3 (проміжок часу, протягом якого концентрація аміаку у потоку ГПС на виході з фільтра стане рівною $c_{пр} = 17.5$ мг/м³ при концентрації NH_3 перед фільтром $c_0 = 700$ мг/м³) [13]. Для прогнозування ресурсу ІВХС скористаємось рівнянням (1), емпіричною залежністю $q_0(RH)$ (5) та середнім емпіричним значенням $\bar{k}_v = 3600$ хв⁻¹. Оскільки розглядається ІВХС одного типу, всі параметри, окрім q_0 і k_v , залишаються постійними, і тільки товщина шару H варіюється. Розрахункова та експериментальна залежності $t_3(RH)$ для двох значень H показані на рис.4.

Результати вимірювань (рис. 4) показали, що t_3 лінійно збільшується зі зростанням відносної вологості ГПС. Подібного роду залежність $t_3(RH)$ була також отримана для ІВХС, виготовленого шляхом просочення нетканого голкопробивного сорбційно-фільтруючого полотна СФМ-ОЦ водним розчином лимонної кислоти з аналогічними модифікаторами [5]. Добре узгодження розрахованих та вимірених значень часу захисної дії ІВХС для різних RH і H вказує на адекватність запропонованого підходу щодо математичної обробки експериментально отриманих вихідних кривих проскоку. Слід зазначити, що час захисної дії ІВХС, розрахований за рівнянням (1) при $RH \geq 30$ % трохи менше експериментальних значень. Але оскільки для протигазових фільтрів нормується-

ся лише мінімальний час захисної дії (для фільтрів 1 класу захисту по аміаку він складає 50 хв), то прогнозування ресурсу ІВХС може бути засновано на рівнянні Уїлера-Джонаса і не потребує проведення експериментальних вимірювань часу захисної дії. Отже, розроблена для АВ процедура прогнозування ресурсу протигазових фільтрів для умов реального використання, може бути використана і для ІВХС на основі лавсанових волокон.

Що стосується практичного застосування даного типу ІВХС, то він задовольняє нормованим вимогам до протигазових фільтрів 1 класу захисту по аміаку вже при $RH \geq 45\%$ і товщині шару $H \geq 12$ мм.

Висновки. На прикладі ІВХС, одержаного шляхом просочення нетканого голкопробивного матеріалу з лавсанових волокон водним розчином лимонної кислоти (40 мас. %) з модифікаторами (гліцерин, хлорид натрію та етанол), запропоновано підхід до аналізу експериментальних кривих проскоку аміаку крізь нерухомий шар ІВХС шляхом побудови залежностей $t_{np}(c_{np})$ у координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} та їх подальшої математичної обробки. Показано, що експериментальні дані в координатах $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} при всіх значеннях відносної вологості ГПС з достовірністю $R^2 \geq 0.95$ апроксимуються прямими лініями - $t_{np} = A - B \cdot \ln(c_0/c - 1)$, і теоретична модель Уїлера-Джонаса [7-11] адекватно описує розглянуту систему адсорбтив-ІВХС. Застосування запропонованого підходу до аналізу експериментальних кривих проскоку у поєднанні з теоретичною моделлю Уїлера-Джонаса дозволило визначити модельні параметри: константу швидкості хемосорбції k_v і сорбційну ємність одиниці маси ІВХС q_0 та їх залежності від відносної вологості ГПС.

Експериментально досліджено вплив відносної вологості ГПС і товщини шару на час захисної дії ІВХС щодо аміаку та обґрунтовано можливість застосування моделі Уїлера-Джонаса для прогнозування ресурсу ІВХС для умов реального використання.

Література:

1. *Appl M. Ammonia* 1. Introduction. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – 2012. – Vol. 3. – P. 107-137. http://dx.doi.org/10.1002/14356007.a02_143.pub3
2. *Bandosz T.J., Petit C.* On the reactive adsorption of ammonia on activated carbons modified by impregnation with inorganic compounds. // J. Colloid Interface Sci. – 2009. – Vol. 338, N 2. – P. 329–345. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.039>
3. *Petit C., Karwacki C., Peterson G., Bandosz T.J.* Interactions of ammonia with the surface of microporous carbon impregnated with transition metal chlorides. // J. Phys. Chem. – 2007. – Vol. 111, N 34. – P. 12705-12714.
4. *Еннан А.А.-А., Хома Р.Є., Длубовський Р.М., Захаренко Ю.С., Беньковська Т.С., Книш І.М.* Моно- та біфункціональні імпрегновані волокнисті хемосорбенти респіраторного призначення. // Вісник ОНУ. Хімія. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 5-30. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).248297](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).248297)

5. Хома Р.Є., Абрамова Н.М., Кіро С.А., Книш І.М. Захист органів дихання від дії аміаку. // Вісник ОНУ. Хімія. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 93-107. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.2\(82\).264892](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.2(82).264892)
6. Lodewyckx P., Wood G.O., Ryu S.K. The Wheeler-Jonas equation: a versatile tool for the prediction of carbon bed breakthrough times. // Carbon. – 2004. –Vol. 42, N 7. – P. 1351–1355. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.016>
7. Jonas L.A., Rehrmann J.A. Predictive equations in gas adsorption kinetics. // Carbon. – 1973. –Vol. 11, N 1. – P. 59-64. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(73\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0008-6223(73)90008-0)
8. Wheeler A., Robell A.J. Performance of fixed-bed catalytic reactors with poison in the feed. // J. Catal. –1969. –Vol. 13, N 3. – P. 299–305. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(69\)90404-7](https://doi.org/10.1016/0021-9517(69)90404-7)
9. Lodewyckx P. Adsorption of chemical warfare agents. // Interface Science and Technology. Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation, Vol. 7, ed. T.J. Bandoz, Ed. Elsevier, 2006. –P. 475-528.
10. Lodewyckx P., Verhoeven L. Using the modified Wheeler-Jonas equation to describe the adsorption of inorganic molecules: chlorine. // Carbon. – 2003. –Vol. 41, N 6. – P. 1215–1219. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00052-6)
11. Grévillet G., Marsteau S., Vallières C. A Comparison of the Wheeler-Jonas Model and the Linear Driving Force at Constant-Pattern Model for the Prediction of the Service Time of Activated Carbon Cartridges. // J. Occup. Env. Hygiene. – 2011. –Vol. 8, N 5. – P. 279-288. <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2011.567131>
12. Газоанализатор “Колион-1В NH₃”, зав. №5880, паспорт ЯРКГ 2840 003-01ПС, 2018.
13. ДСТУЕН 14387: 2004 Фільтри протигазові і фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Київ: Держспоживстандарт України. 2008. – 14 с.

Kiro S.A., Abramova N.N., Gridyaev V.V., Khoma R.E.

**Impregnated fibrous ammonia chemisorbent based on citric acid.
Prediction of protective characteristics**

SUMMARY

The influence of relative humidity (RH) of the gas-air environment on the ammonia chemisorption by impregnated fibrous chemisorbent (IFCS) is studied. IFCS was obtained by impregnating nonwoven needle-punched material from polyester fibers with an aqueous solution of citric acid (40 w%) with modifiers (glycerin, sodium chloride and ethanol) to uniformly distribute the chemisorbent on the surface of the fibers and increase adhesion to the composition of the impregnating solution. It is shown that for all values of relative humidity the curves of ammonia breakthrough through a fixed layer of IFCS $c_{np}(t_{np})$ in the coordinates $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} are reliably $R^2 \geq 0,95$ approximated by straight lines and the Wheeler-Jonas theoretical model can be used for the quantitative description of the ammonia-IFCS

system. By comparing the experimental and theoretical curves $c_{np}(t_{np})$ in the coordinates, $\ln(c_0/c_{np} - 1)$, t_{np} the unknown model parameters were determined: the chemisorption rate constant and the sorption capacity of the IFCS unit mass and their dependence on the relative humidity of the gas-air environment (GAE). It has been established that the IFCS sorption capacity increases linearly with increasing RH, and the chemisorption rate constant of the ammonia-IFCS system does not depend on the GAE relative humidity and is equal to 3600 s^{-1} . The influence of the GAE relative humidity and the thickness of the IFCS layer on the ammonia breakthrough time is experimentally investigated and the adequacy of using the Wheeler-Jonas model for predicting the service life of IFCS for real use conditions is substantiated.

Key words: impregnated fibrous chemisorbent, gas filters, ammonia, dynamic sorption, mathematical model of adsorption, breakthrough curves, chemisorption rate constant, sorption capacity, breakthrough time.