

ФІЗИКА АЕРОЗОЛІВ

УДК 628.16.081.3

Кіро С.А.¹, Єфіменко О.П.², Хома Р.Є.¹

¹Фізико-хімічний інститут захисту здоров'я людини і довкілля Одеського національного університету імені І.І. Мечникова. E-mail: eksvar@ukr.net

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адсорбційні характеристики активованих вуглецевих волокнистих матеріалів щодо циклогексану. Вплив відносної вологості газоповітряного середовища.

У динамічних умовах досліджено вплив відносної вологості (RH) газоповітряного середовища (ГПС) на адсорбцію циклогексану комерційно доступним в Україні нетканним активованим вуглецевим волокнистим матеріалом (АВВМ) «Карбапон В-Актив». Показано, що для кожного значення відносної вологості в діапазоні 16-84% криві проскоку циклогексану через нерухомий шар АВВМ в координатах (t_{np} , $\ln(c_0/c_{np}-1)$) апроксимуються прямими лініями - $t_{np} = A - B \cdot \ln(c_0/c_{np}-1)$, і рівняння Уїлера-Джонаса можна використовувати для аналізу кривих проскоку та визначення його залежних змінних: адсорбційної ємності АВВМ - $q_0(RH)$ та константи швидкості адсорбції пари C_6H_{12} - $k_v(RH)$. Показано, що присутність водяної пари у ГПС не впливає на адсорбційну ємність АВВМ приблизно до $RH = 35\%$, і тільки потім, q_0 поступово зменшується із збільшенням відносної вологості; константа швидкості адсорбції k_v суттєво зменшується із збільшенням RH. У діапазоні RH 30-85% одержані допоміжні емпіричні рівняння для залежних змінних рівняння Уїлера-Джонаса $q_0(RH)$ і $k_v(RH)$. Продемонстровано адаптацію рівняння Уїлера-Джонаса для прогнозування часу захисної дії в умовах реального використання, варіюючи його незалежні змінні: масу і геометричні розміри шару адсорбента, концентрацію пари C_6H_{12} та відносну вологість ГПС. Обговорено перспективність використання нетканого «Карбапон В-Актив» для захисту органів дихання, зокрема, для спорядження респіраторів з фільтруючою лицевою частиною.

Ключові слова: активовані вуглецеві волокнисті матеріали, циклогексан, динамічна сорбція, модель адсорбції Уїлера-Джонаса, криві проскоку, константа швидкості адсорбції, сорбційна ємність, час захисної дії.

Вступ. Забруднення навколишнього середовища антропогенними леткими органічними сполуками (ЛОС) набуло великих масштабів протягом останніх десятиліть [1]. Присутні в газових викидах промислових підприємств та транспорту, у будівництві і побуті, вони токсичні та шкідливі навіть за низьких концентрацій, особливо у внутрішньому середовищі приміщень [2, 3]. У зв'язку з цим актуальною постає проблема запобігання шкідливої дії ЛОС на здоров'я людини [1-3].

Гранульоване активоване вугілля (АВ) є найпоширенішим адсорбентом, який використовується для захисту органів дихання від забруднень газової фази, таких як ЛОС, через його ефективність та низьку вартість. Однак недоліком АВ через його гранульовану форму є необхідність утримання АВ у корпусі

протигазового або скомбінованого фільтра, що ускладнює конструкцію, збільшує вагу та об'ємність еластомірного респіратору з повітронепроникною лицевою частиною та створює дискомфорт користувачам [4]. Альтернативним адсорбентом ЛОС для спорядження респіраторів з фільтруючою лицевою частиною та незначним опором диханню є активований вуглецевий волокнистий матеріал (АВВМ). Отримують АВВМ шляхом високотемпературної карбонізації та активації полімерних волокнистих матеріалів, які виготовлені з волокон поліакрилонітрилу, пеку чи віскози діаметром від 10 до 20 мкм [5]. Неткані АВВМ мають низку переваг у порівнянні зі гранульованим АВ [5-10]: рівнодоступну для адсорбтива волокнисту структуру високої пористості; більшу питому поверхню; більшу частку внутрішньої поверхні, яку займають мікропори (мікропористість зосереджена на поверхні волокон, пори короткі та прямі); здатність зберігати фізичну форму волокнистого матеріала-попередника. Ці морфологічні характеристики АВВМ сприяють швидкій адсорбції у фільтруючих системах ЛОС, де час перебування адсорбтива в адсорбенті незначний, як це відбувається при проходженні забрудненого повітря через фільтруючу лицеву частину респіратору. До недоліків АВВМ слід віднести досить складний та енергоємний технологічний процес їх отримання та, як наслідок, високу вартість порівняно з АВ.

Більшість досліджень адсорбційної здатності АВВМ щодо ЛОС стосуються рівноважних умов. Головною метою цих досліджень було визначення ізотерм адсорбції ЛОС та впливу фізико-хімічних властивостей АВВМ на їх адсорбційні характеристики [6-9]. За результатами досліджень адсорбції ЛОС (бензол, бутанон, толуол і ксилен) комерційно доступними АВВМ в динамічних умовах [10-14]: отримано криві проскоку ЛОС за різних робочих умов, таких як концентрація, температура і швидкість потоку газу, маса (товщина шару) і щільність адсорбенту; встановлено залежність часу захисної дії від маси АВВМ та здійснено їх ранжування за динамічною адсорбційною здатністю. Однак певні умови досліджень, зокрема швидкість фільтрації та вологість газоповітряного середовища (ГПС), не відображають умови реального використання респіраторів з фільтруючою лицевою частиною. Присутність водяної пари у ГПС - це ще один фактор, який необхідно враховувати при визначенні ресурсу та придатності АВВМ для захисту органів дихання.

Напівемпірична модель Уїлера-Джонаса [15, 16] широко використовується для оцінювання ресурсу протигазового або скомбінованого фільтра, спорядженого гранульованим АВ або АВВМ, однак дає точні прогнози часу проскоку ЛОС з температурами кипіння більше 65°C тільки в сухих ГПС [17, 18].

Мета роботи – визначення впливу вологості ГПС на адсорбційні характеристики комерційно доступного в Україні АВВМ щодо циклогексану (репрезентативного представника ЛОС з температурою кипіння більше 65°C [19]), та адаптація рівняння Уїлера-Джонаса для урахування впливу вологості ГПС.

Методика експерименту та опрацювання експериментальних даних. Принципову схему експериментальної установки наведено на рис.1. В якості АВВМ нами було обрано нетканий активований вуглецевий волокнистий мате-

ріал «Карбапон В-Актив» (ТУ ВУ 400031289.104-2013) товщиною $2 \cdot 10^{-3}$ м та поверхневою щільністю 170 г/м^2 , виготовлений на основі активованого віскозного волокна. З АВВМ виготовляли диски і висушували їх до постійної маси при 110°C . В адаптер випробувальної камери герметично встановлювали три диски, при цьому товщина фільтруючого шару АВВМ становила $H = 6 \cdot 10^{-3}$ м, площа фільтруючої поверхні - $S = 41.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, об'ємна щільність АВВМ - $\rho = 8.4 \cdot 10^4 \text{ г/м}^3$. У процесі випробувань швидкість фільтрації ГПС становила $U = 2.4 \text{ м/хв}$ (витрата ГПС $Q = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$) і є типовою для респіраторів з фільтруючою лицевою частиною при помірних фізичних навантаженнях користувача (середня площа фільтруючої поверхні таких респіраторів – 0.028 м^2 , об'ємна витрата дихання – $67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$).

Температуру та відносну вологість ГПС (RH) регулювали співвідношенням сухого та вологого повітря, що надходили 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 АВВМ умовам експерименту (за температурою та відносною вологістю ГПС) перед кожним вимірюванням проводили кондиціону-

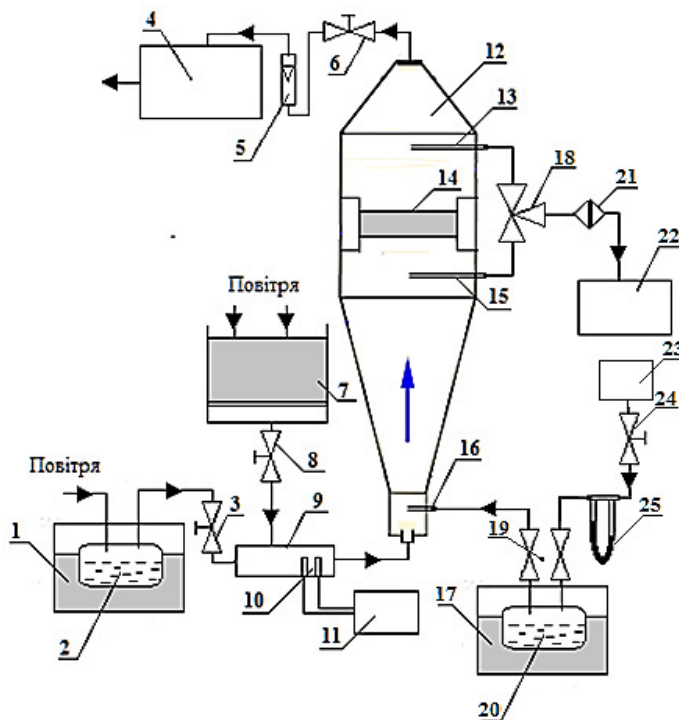


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки: 1, 17 – водяні термостати; 2 – зволожувач повітря; 3, 6, 8, 21, 24 – регулюючі вентилі; 4 – аспіратор; 5 – рота-метр; 7 – осушувач повітря із силікагелем; 9 – змішувач сухого та вологого повітря; 10 – датчики вологості та температури; 11 – термометр-гігрометр ТА218С; 12 – випробувальна камера; 13, 15 – пробовідбірні трубки; 14 – адаптер шару АВВМ; 16 – трубка подачі C_6H_{12} у змішувач; 18 – кран 3-ходовий; 19 – перемикальні крани; 20 – випарник (гусьок) C_6H_{12} ; 21 – протиаерозольний фільтр; 22 – газоаналізатор Коліон-1В/ C_6H_{12} ; 23 – міні-компресор; 25 – реометр.

вання фільтруючого шару протягом 1 години при витраті ГПС $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ (температура $23 \pm 1^\circ\text{C}$ і RH у діапазоні 16 – 84 %).

Визначення кривих проскоку пари циклогексану через нерухомий шар АВВМ проводили при вхідній концентрації пари C_6H_{12} у ГПС $c_0 = 2250 \pm 200 \text{ мг/м}^3$ (приблизно 28 ГДК у повітрі робочої зони і 1610 ГДК у атмосферному повітрі населених місць). Вхідну концентрацію c_0 визначали гравіметричним методом, а її сталість контролювали витратою повітря-носія $0.12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ (реометр 25) і температурою (23°C) випарника 20. Для вимірювання вихідної концентрації пари C_6H_{12} у ГПС c_{np} використовували калібрований по циклогексану газоаналізатор безперервної дії "Коліон-1В/ C_6H_{12} " з фотоіонізаційним детектором [20]. Відносна похибка вимірювання у діапазоні концентрацій 0 – 2000 мг/м^3 не перевищувала $\pm 15\%$. Для подачі C_6H_{12} та відбору проб ГПС з об'ємною швидкістю $0.36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ використовували тефлонові сполучні трубки (PTFE 4/2) та скляні пробовідбірники. 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} (проміжок часу протягом якого концентрація циклогексану у ГПС на виході з шару стане рівною c_{np} при її концентрації перед шаром c_0) проводили з частотою 1 хв^{-1} .

Типові криві проскоку пари циклогексану через шар АВВМ при різних значеннях відносної вологості ГПС представлені на рис. 2А.

Для опрацювання експериментальних даних було застосовано рівняння Уїлера-Джонаса для часу проскоку t_{np} [16, 21, 22]:

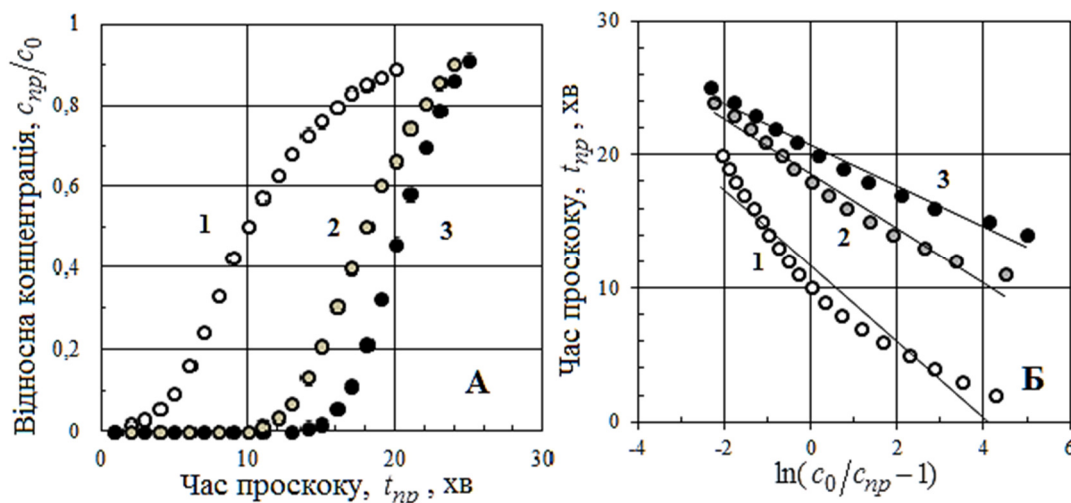


Рис. 2. Криві проскоку C_6H_{12} через шар АВВМ для різних значень відносної вологості ГПС в координатах: А- (c_{np}/c_0 , t_{np}); Б - (t_{np} , $\ln(c_0/c_{np} - 1)$). 1 - $RH = 84\%$; 2 - $RH = 41\%$; 3 - $RH = 16\%$.

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

де t_{np} – час проскоку (хв); $M = \rho \cdot S \cdot H$ – маса шару АВВМ (г), $Q = U \cdot S$ – об'ємна швидкість фільтрації ГПС ($\text{м}^3/\text{хв}$); c_0 – вхідна концентрація C_6H_{12} у ГПС ($\text{мг}/\text{м}^3$); q_0 – сорбційна ємність одиниці маси шару, рівноважна концентрації c_0 ($\text{мг}/\text{г}$); ρ – об'ємна щільність шару АВВМ ($\text{г}/\text{м}^3$); k_v – константа швидкості адсорбції (хв^{-1}); c_{np} – концентрація C_6H_{12} у ГПС на виході з шару при проскоку ($\text{мг}/\text{м}^3$); H – товщина шару АВВМ (м); S – площа фільтруючої поверхні (м^2); U – швидкість фільтрації ГПС ($\text{м}/\text{хв}$).

Відповідно до рівняння (1), залежними змінними, на які може впливати вологість ГПС, є адсорбційна ємність - q_0 та константа швидкості адсорбції - k_v . Незалежні змінні рівняння: маса і геометричні розміри шару АВВМ, швидкість фільтрації, концентрація пари C_6H_{12} та відносна вологість ГПС є вхідними даними, що характеризують умови експерименту.

Правомірність застосування моделі Уїлера-Джонаса для оцінювання впливу вологості на адсорбційні характеристики АВВМ щодо ЛОС з температурами кипіння більше 65°C впливає із даних, представлених на рис. 2Б. Як видно, криві проскоку C_6H_{12} через нерухомий шар АВВМ в координатах $(t_{np}, \ln(c_0/c_{np}-1))$ при всіх значеннях відносної вологості апроксимуються прямими лініями - $t_{np} = A - B \cdot \ln(c_0/c_{np}-1)$, отже, рівняння (1) може бути використано для визначення q_0 і k_v та їх залежності від відносної вологості ГПС:

$$q_0 = A \cdot \frac{c_0 \cdot Q}{M}, \quad k_v = \frac{A}{B} \cdot \frac{\rho \cdot Q}{M}. \quad (2)$$

Зазначимо також, що достовірність лінійних апроксимацій кривих проскоку поступово зменшується (форма кривих прориву асиметрично спотворюється) зі збільшенням RH (рис. 2Б).

Результати експерименту та їх обговорення. Для умов експерименту результати розрахунку параметрів A та B лінійних апроксимацій кривих проскоку в координатах $(t_{np}, \ln(c_0/c_{np}-1))$ методом найменших квадратів, а також розраховані за рівняннями (2) значення q_0 і k_v , наведено у табл. 1. Як видно, присутність водяної пари у ГПС не впливає на адсорбційну ємність АВВМ приблизно до $RH \approx 35\%$, і тільки потім, q_0 поступово зменшується із збільшенням відносної вологості (адсорбована водяна пара зменшує доступний для ЛОС адсорбційний об'єм). Слід також враховувати конкуренцію між органічною та водяною парою, тобто здатність органічної пари відновлювати свій адсорбційний простір [7, 17, 23].

Таблиця 1. Величини параметрів апроксимуючих прямих та розраховані значення параметрів q_0 і k_v адсорбційного процесу.

$RH, \%$	$A, \text{хв.}$	R^2	$B, \text{хв}$	$q_0, \text{мг/г}$	$k_v, \text{хв}^{-1}$
16	20.72	0.98	1.52	225	5500
30	20.81	0.96	1.59	225	5300
35	20.42	0.96	1.83	220	4500
41	18.57	0.95	2.04	200	3700
55	15.41	0.94	2.51	170	2500
64	14.73	0.93	2.73	160	2200
84	11.64	0.91	2.84	125	1600

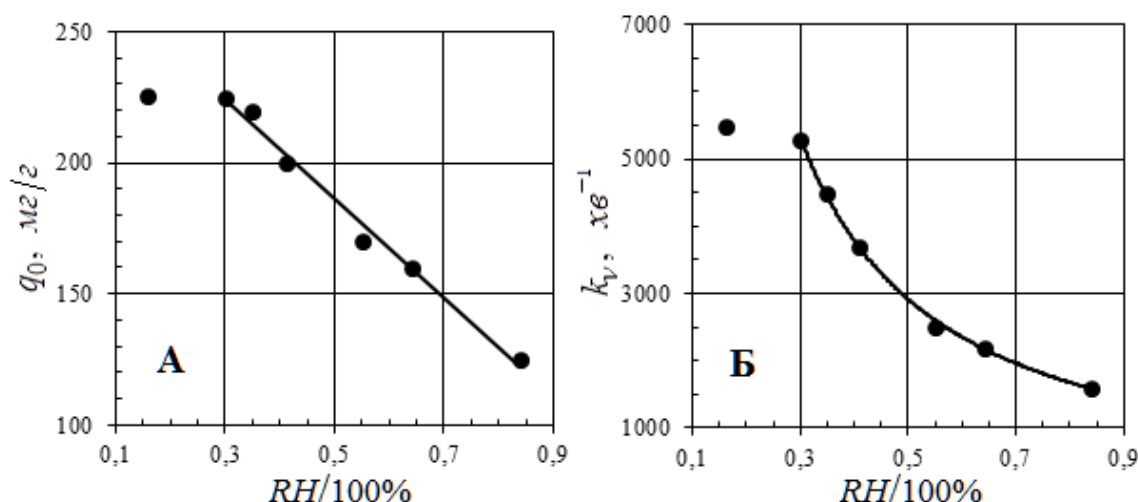


Рис. 3. Залежність адсорбційних характеристик АВВМ q_0 і k_v від відносної вологості ГПС: точки - обробка результатів експерименту за рівняннями (2); суцільна лінія (А)- лінійна апроксимація у діапазоні RH 30 – 84% (рівняння (3)); крива лінія (Б) - апроксимація степеневою функцією (рівняння (4)).

Що стосується константи швидкості адсорбції пари C_6H_{12} , то k_v суттєво зменшується із збільшенням відносної вологості ГПС - адсорбована у мікро-і мезопорах АВВМ водяна пара перешкоджає адсорбції та сповільняє швидкість масопереносу. У діапазоні відносної вологості ГПС 30–85% залежність $q_0(RH)$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 \geq 0.98$ апроксимується прямою лінією (рис.3А), а $k_v(RH)$ з $R^2 \geq 0.99$ апроксимується степеневою функцією (рис.3Б):

$$q_0(RH) = 280 - 190 \cdot (RH/100\%), \text{мг/г}, (RH \text{ виражено у } \%). \quad (3)$$

$$k_v(RH) = 1290 \cdot (RH/100\%)^{-1.18}, \text{хв}^{-1}, (RH \text{ виражено у } \%). \quad (4)$$

Привизначенні ресурсу та придатності АВВМ «Карбапон В-Актив» для спорядження протигазових фільтрів респіраторів з фільтруючою лицевою частиною скористаємось рівнянням Уїлера-Джонаса (1) та емпіричними залежностями $q_0(RH)$ (3) і $k_v(RH)$ (4). Ресурс протигазових або скомбінованих фільтрів еластомірних респіраторів з повітронепроникною лицевою частиною або протигазів 1 класу захисту від циклогексану (А1) зазвичай визначають за мінімаль-

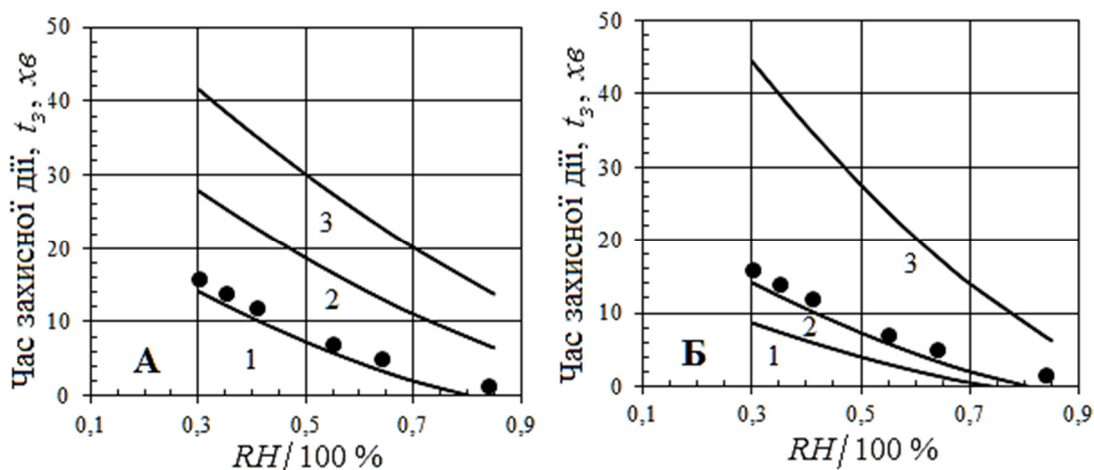


Рис. 4. Залежність часу захисної дії від відносної вологості ГПС $t_3(RH)$.

Експеримент: $H = 6$ мм, $c_0 = 2250$ мг/м³. Розрахунок (А) $c_0 = 2250$ мг/м³:

1- $H = 6$ мм, 2- $H = 10$ мм, 3- $H = 14$ мм. Розрахунок (Б) $H = 6$ мм:

1- $c_0 = 3500$ мг/м³, 2- $c_0 = 2250$ мг/м³, 3- $c_0 = 800$ мг/м³.

ним часом захисної дії t_3 (проміжок часу, протягом якого концентрація пари C_6H_{12} у ГПС на виході з фільтра стане рівною $c_{np} = 35$ мг/м³). Згідно [16], t_3 нормується при вхідній концентрації циклогексану $c_0 = 3500$ мг/м³ і складає $t_3 = 70$ хв. Розрахункові та експериментальні залежності $t_3(RH)$ при різних значеннях H і c_0 показані на рис.4.

Результати вимірювань показують, що t_3 суттєво зменшується зі зростанням відносної вологості ГПС. Добре узгодження, розрахованих та вимірних значень часу захисної дії АВВМ «Карбапон В-Актив» для RH у діапазоні 30–85%, вказує на адекватність застосування рівняння Уїлера-Джонаса (1) та емпіричних залежностей $q_0(RH)$ (3) і $k_v(RH)$ (4) для прогнозування ресурсу та придатності АВВМ для захисту органів дихання.

Що стосується практичного застосування даного типу АВВМ, то малоімовірно, що використання нетканого АВВМ з об'ємною щільністю $\rho = 8.4 \cdot 10^4$ г/м³ у респіраторі з фільтруючою лицевою частиною може забезпечити масу адсорбенту, достатню для захисту органів дихання від ЛОС на нормованому у ДСТУ EN 14387 рівні [16]. Справді, для середньої площі фільтруючої поверхні таких респіраторів - 0.028 м² і товщині шару АВВМ - $H = 0.01$ м вона складає приблизно 23 г. Для порівняння, маса АВ у протигазових або скомбінованих фільтрів еластомірних респіраторів з повітронепроникною лицевою частиною або протигазів перевищує 100 г. Тим не менш (див. рис. 4), використання легкого адсорбента «Карбапон В-Актив», як додаткового поглинального шару протиаерозольних респіраторів, забезпечить захист від впливу ЛОС з низькою концентрацією («неприємного запаху») у громадських місцях, транспорті, робочому місці чи вдома, а також короточасний захист при більш високих концентраціях у надзвичайних ситуаціях.

Висновки. Аналіз кривих проскоку відповідно до моделі Уїлера-Джонаса показав, що адсорбційна ємність АВВМ і константа швидкості адсорбції пари C_6H_{12} зменшуються через присутність водяної пари у ГПС. У діапазоні RH 30–85 % одержані допоміжні емпіричні рівняння для залежних змінних рівняння Уїлера-Джонаса $q_0(RH)$ і $k_v(RH)$. Продemonстровано адаптацію рівняння Уїлера-Джонаса для прогнозування часу захисної дії в умовах реального використання, змінюючи його незалежні змінні: масу і геометричні розміри шару адсорбента, концентрацію пари C_6H_{12} та відносну вологість ГПС.

Література:

1. Mangotra A., Singh S.K. Volatile organic compounds: A threat to the environment and health hazards to living organisms - A review. // Journal of Biotechnology. – 2024. – Vol. 382. – P. 51-69. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2023.12.013
2. Посудін Ю.І. Вплив летких органічних сполук у повітрі приміщень на здоров'я людини. // Довкілля та здоров'я. – 2011. - №4. – С. 31-36.
3. Tsai W.T. An overview of health hazards of volatile organic compounds regulated as indoor air pollutants.// Reviews on Environmental Health. – 2019. – Vol. 34, N 1. – P. 81-89. DOI: 10.1515/reveh-2018-0046
4. Salazar M.K., Connon C., Takaro T.K., Beaudet N., Barnhart S. An evaluation of factors affecting hazardous waste workers' use of respiratory protective equipment. // Amer. Ind. Hyg. Assoc. J. – 2001. – Vol. 62. – P. 236–245. DOI: [10.1080/15298660108984627](https://doi.org/10.1080/15298660108984627)
5. Hassan M.F., Sabri M.A., Fazal H., Hafeez A., Shahzad N., Hussain M. Recent trends in Activated Carbon Fibers production from various precursors and applications—A comparative review //Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. - 2020. – Vol. 145.– P.104715. DOI: 10.1016/j.jaap.2019.104715
6. Balanay J.A.G, Lungu C.T. Morphologic and surface characterization of different types of activated carbon fibres // Adsorpt Sci Technol. – 2012, - Vol. 30, N 4. – P.355-368. DOI:[10.1260/0263-6174.30.4.355](https://doi.org/10.1260/0263-6174.30.4.355)
7. Zhang X., Gao B., Creamer A.E., Cao C., Li Y. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review // Journal of Hazardous Materials. - 2017. –Vol. 338. – P.102-123. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.013
8. Baur G.B., Yuranov I., Renken A., Kiwi-Minsker L. Activated carbon fibers for efficient VOC removal from diluted streams: The role of surface morphology // Adsorption. – 2015. – Vol. 21 P. 479–488. DOI: 10.1007/s10450-015-9685-5
9. Tsai J.H., Chiang H.M., Huang G.Y. Chiang H.L. Adsorption characteristics of acetone, chloroform and acetonitrile on sludge-derived adsorbent, commercial granular activated carbon and activated carbon fibers. // J Hazard Mater. – 2008. – Vol. 154, N 1-3. – P.1183-1191. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.065
10. Balanay J.A., Bartolucci A.A., Lungu C.T. Adsorption characteristics of activated carbon fibers (ACFs) for toluene: application in respiratory protection // Occup. Environ. Hyg. – 2014. – Vol. 11, № 3. – P. 133-143. DOI: 10.1080/15459624.2013.816433
11. Huang Z-H., Kang F, Liang K-M., Hao J. Breakthrough of methylethylketone and benzene vapors in activated carbon fiber beds. // J Haz Mater. – 2003. – Vol. 98, N 1-3. – P. 107–115. DOI: 10.1016/S0304-3894(02)00284-4

12. *Das D., Gaur V., Verma N.* Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber // *Carbon*. – 2004. – Vol. 42, N 14. – P. 2949-2962. DOI: [10.1016/s0304-3894\(02\)00284-4](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(02)00284-4)
13. *Balanay J.A., Floyd E.L., Lungu C.T.* Breakthrough curves for toluene adsorption on different types of activated carbon fibers: application in respiratory protection // *Ann. Occup. Hyg.* – 2015. – Vol. 59, № 4. – P. 481–490. DOI: 10.1093/annhyg/meu105
14. *Summers M., Oh J., Lungu C.T.* Determination of activated carbon fiber adsorption capacity for several common organic vapors: applications for respiratory protection. // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2022. – Vol. 72, N 6. – P. 570-580. DOI: 10.1080/10962247.2021.1985013
15. *Jonas L.A., Rehrmann J.A.* Predictive equations in gas adsorption kinetics. // *Carbon*. – 1973. – Vol. 11, N 1. – P. 59-64. DOI: 10.1016/0008-6223(73)90008-0
16. *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. DOI: 10.1016/0021-9517(69)90404-7
17. *Lodewyckx P., Vansant E.F.* Influence of humidity on adsorption capacity from the Wheeler-Jonas model for prediction of breakthrough times of water immiscible organic vapors on activated carbon beds. // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1999. – Vol. 60, N 5. – P. 612-617. DOI: [10.1080/00028899908984480](https://doi.org/10.1080/00028899908984480)
18. *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>
19. ДСТУ EN 14387:2008 Фільтри протигазові і фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Київ: Держспоживстандарт України. 2008. – 14 с.
20. Газоаналізатор “Колион-1В/С₆Н₁₂”, зав. № 5877, паспорт ЯРКГ 2840 003-01ПС, 2018.
21. *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>
22. *Кіро С.А., Абрамова Н.М., Грідяєв В.В., Хома Р.Є.* Імпрегнований волокнистий хемосорбент аміаку на основі лимонної кислоти. Прогнозування захисних характеристик. // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2023. – № 61. – С.202-211. DOI: 10.18524/0367-1631.2023.61.292234
23. *Gong R., Keener T.C.* A qualitative analysis of the effects of water vapor on multicomponent vapor-phase carbon adsorption. // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 1993. – Vol. 43, № 6. – P. 864-872. DOI: [10.1080/1073161X.1993.10467169](https://doi.org/10.1080/1073161X.1993.10467169)

Kiro S.A., Yefimenko O.P., Khoma R.E.

**Adsorption characteristics of cyclohexane on activated carbon fiber material.
Influence of the gas-air environment relative humidity**

SUMMARY

The influence of the gas-air environment (GAE) relative humidity (RH) on adsorption of cyclohexane by commercially available in Ukraine non-woven activated carbon fiber material (ACFM) "Carbapon B-Active" was investigated under dynamic conditions. It is shown that for each relative humidity value in the range of 16-84% the curves of cyclohexane breakthrough through a fixed layer of ACFM in the coordinates (t_{np} , $\ln(c_0/c_{np}-1)$) are approximated by straight lines - $t_{np} = A - B \cdot \ln(c_0/c_{np}-1)$, and the Wheeler-Jonas equation can be used to analyze the breakthrough curves and determine its dependent variables: ACFM adsorption capacity - $q_0(RH)$ and the C_6H_{12} vapor adsorption rate constant - $k_v(RH)$. It is shown that the presence of water vapor in the GAE does not affect ACFM adsorption capacity up to approximately $RH = 35\%$, and only then q_0 gradually decreases with increasing relative humidity; adsorption rate constant k_v significantly decreases with increasing RH. In the range of RH 30 - 85% auxiliary empirical equations for the dependent variables of the Wheeler-Jonas equation $q_0(RH)$ and $k_v(RH)$ are obtained. The adaptation of the Wheeler-Jonas equation for predicting the breakthrough times under real-life conditions is demonstrated by varying its independent variables: mass and adsorbent layer geometric dimensions, C_6H_{12} vapor concentration and GAE relative humidity. The prospects of using a layer of non-woven "Carbapon B-Active" for respiratory protection, in particular, for filtering facepiece respirators, are discussed.

Key words: *activated carbon fiber materials, volatile organic compounds, cyclohexane, gas filters and combined filters, dynamic sorption, Wheeler-Jonas adsorption model, breakthrough curves, adsorption rate constant, sorption capacity, breakthrough time.*