

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРЬКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

В.О. Ткачов, І.М. Чуб

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та виконання лабораторних робіт з
дисципліни

«МАСОПЕРЕДАЧА»

(для студентів 3-4 курсів денної і заочної форм навчання
освітньо – кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки 0926
“Водні ресурси”, 6.060103 “Гідротехніка (Водні ресурси)” спеціальності
6.092600 “Водопостачання та водовідведення”)

ХАРКІВ – ХНАМГ–2009

Методичні вказівки до практичних занять та виконання лабораторних робіт з дисципліни «Масопередача» (для студентів 3-4 курсів денної і заочної форм навчання освітньо – кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки 0926 “Водні ресурси”, 6.060103 “Гідротехніка (Водні ресурси)” спеціальності 6.092600 “Водопостачання та водовідведення”)./ Укл.: Ткачов В.О., Чуб І.М. - Харків: ХНАМГ, 2009.- 50 с.

Укладачі: В.О. Ткачов, І.М. Чуб

Рецензент: докт. техн. наук, проф. С.С. Душкін

Рекомендовано кафедрою водопостачання,
водовідведення та очищення вод,
протокол №1 від 2.09.2008 р.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

ВСТУП

Ці методичні вказівки розроблені для студентів 3-4 курсів денної і заочної форм навчання спеціальності “Водопостачання та водовідведення” і мають допомогти студентам при вирішенні завдань на практичних заняттях та виконанні лабораторних робіт.

На практичних заняттях студент одержує навички складання рівнянь матеріального балансу, розрахунку сорбційних процесів за різними схемами. Навчається загальним прийомам розрахунку сорбційних апаратів з нерухомим і псевдорозрідженим шаром.

У методичних вказівках наведено приклади типових задач з дисципліни “Масопередача”. Після кожної розв’язаної задачі у таблицях містяться вихідні дані для самостійного вирішення. Поєднання розв’язування задач з лабораторними роботами допомагає більш ефективно засвоїти теоретичні знання.

Мета лабораторних робіт - закріплення знань з курсу, практичне вивчення процесів на діючих апаратах, придбання практичних навичок побудови ізотерми, вивчення адсорбційних властивостей АВ різних марок, аналіз роботи сорбційних апаратів зі щільним шаром і визначення динамічних характеристик фільтруючого шару сорбенту.

У підготовці студентів як майбутніх фахівців-технологів дисципліна “Масопередача” відіграє важливу роль.

РОЗДІЛ 1

СКЛАДАННЯ РІВНЯНЬ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ ДЛЯ СХЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДООБРОБКИ

Приклад 1. Визначити витрату води Q , що надходить у кільцеву водогінну мережу, і витрати на її окремих ділянках для схеми, наведеної на рис. 1. Витрати води, поданої споживачеві q для кожного вузла, наведені також на схемі: $q_1=30$ л/с, $q_2=20$ л/с, $q_3=15$ л/с, $q_4=30$ л/с, $q_5=20$ л/с, $q_6=25$ л/с.

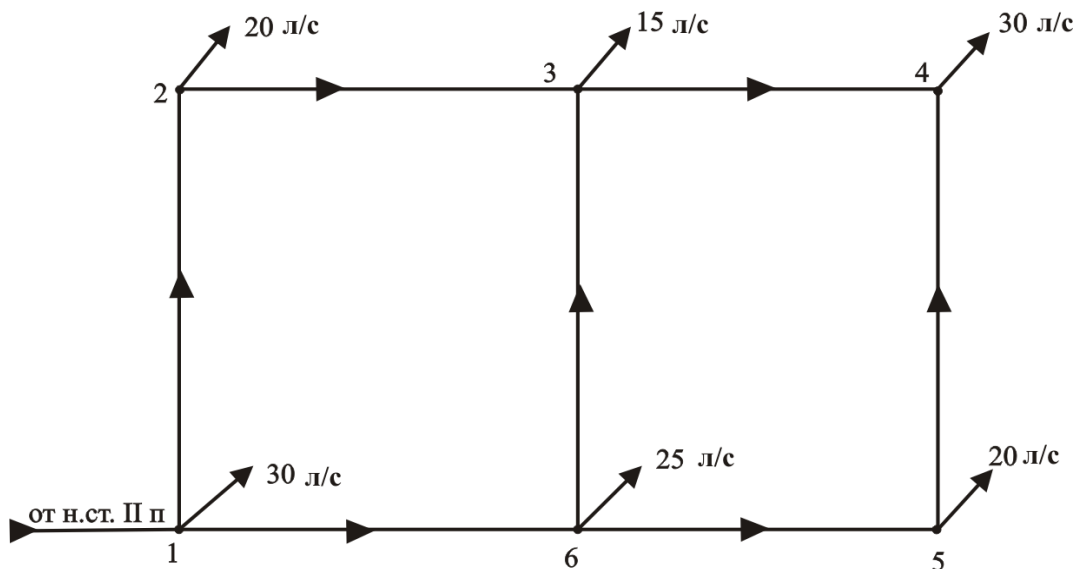


Рис. 1.1 – Схема кільцевої водогінної мережі

Розв'язання. Для кожного вузла кількість поданої води у вузол дорівнює кількості води, що відходить з цього вузла. Для всієї кільцевої мережі

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (1.1)$$

Для наведеної схеми складемо баланс вузла № 4. Сума вхідних у вузол витрат дорівнює сумі вихідних з вузла:

$$Q_{3-4} + Q_{4-5} = q_4 = (10 + 20) = 30 \text{ л/с.}$$

$$Q_{3-4} = 10 \text{ л/с; } Q_{4-5} = 20 \text{ л/с.}$$

Витрата на ділянці Q_{5-6} дорівнює сумі витрат q_5 і Q_{4-5} :

$$Q_{5-6} = q_5 + Q_{4-5} = 20 + 20 = 40 \text{ л/с.}$$

Витрата води, яка виходить з вузла № 3, дорівнює сумі $Q_{3-4} = 10$ л/с і $q_3 = 15$ л/с:

$$Q_{3-4} + q_3 = Q_{6-3} + Q_{2-3} = 25 \text{ л/с. Тоді } Q_{2-3} = 10 \text{ л/с, а } Q_{6-3} = 15 \text{ л/с.}$$

Витрата на ділянці $Q_{1-6} = Q_{5-6} + Q_{6-3} + q_6 = 40 + 15 + 25 = 80$ л/с.

Витрата на ділянці $Q_{1-2} = Q_{2-3} + q_2 = 10 + 20 = 30$ л/с. Тоді загальна витрата води, що надходить у кільцеву водогінну мережу, буде дорівнювати:

$$Q = Q_{1-2} + Q_{1-6} + q_1 = 30 + 80 + 30 = 140 \text{ л/с.}$$

Виконуємо перевірку за рівнянням (1.1):

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 140 = 30 + 20 + 15 + 30 + 20 + 25 = 140 \text{ л/с.}$$

Таблиця 1.1

Номери варіантів	Вихідні дані					
	q_1 л/с	q_2 л/с	q_3 л/с	q_4 л/с	q_5 л/с	q_6 л/с
1	25	20	15	40	25	10
2	10	25	20	30	15	20
3	15	15	10	25	30	25
4	20	20	15	35	10	15

Приклад 2. У резервуар - змішувач надходять три потоки забрудненої води з відомими кількісними і якісними показниками. Визначити кількість і якість води, що виходить з резервуару на очищення.

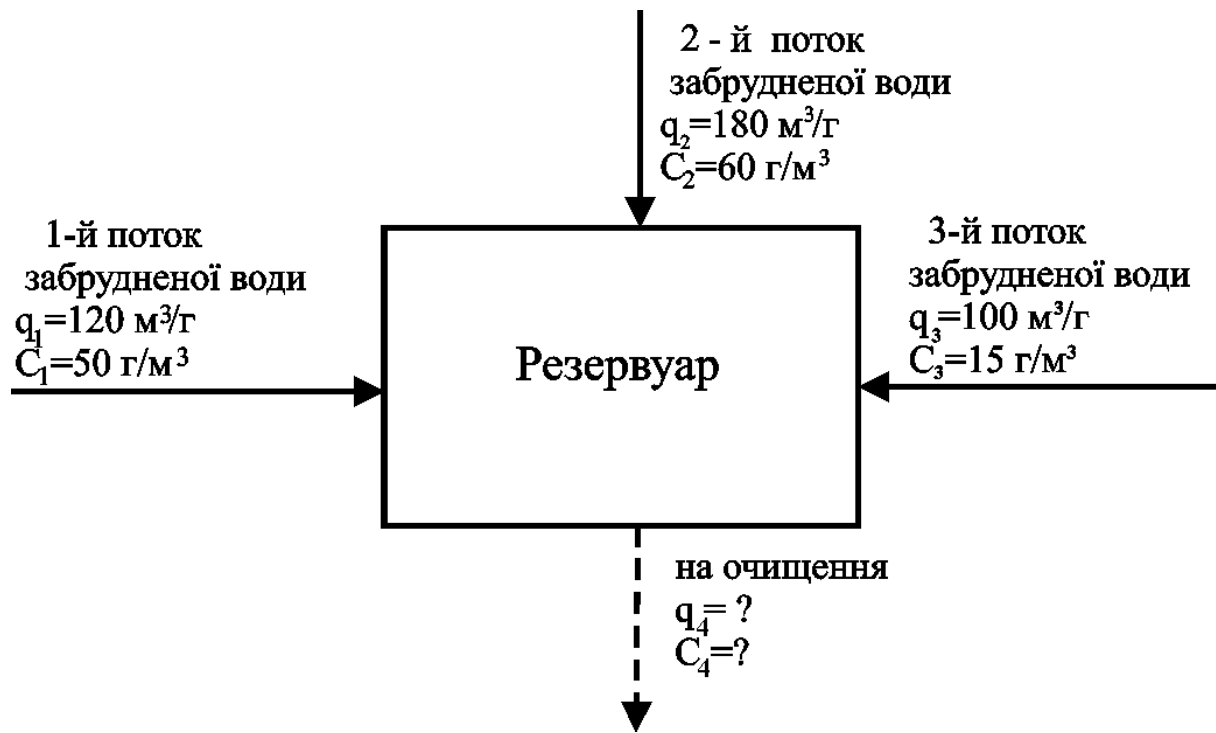


Рис. 1.2 – Характеристика стічних вод з різних потоків, що надходять у резервуар-змішувач

Розв’язання. Складемо рівняння матеріального балансу резервуара-змішувача:

$$q_1 C_1 + q_2 C_2 + q_3 C_3 = q_4 C_4. \quad (1.2)$$

За рівнянням матеріального балансу (1.2) знаходимо невідому концентрацію C_4 , тому що витрата q_4 – це сума витрат, які надходять у змішувач.

$$q_4 = q_1 + q_2 + q_3, \text{ м}^3/\text{год},$$

$$120 \cdot 50 + 180 \cdot 60 + 100 \cdot 15 = 400 \cdot C_4,$$

$$18300 = 400 \cdot C_4,$$

$$C_4 = 18300 \div 400 = 45.75 \text{ г/м}^3,$$

$$C_4 = 45.75 \text{ г/м}^3; q_4 = 400 \text{ м}^3/\text{ГОД}.$$

Таблиця 1.2

Номери варіантів	Вихідні дані					
	q_1 м ³ /год	C_1 г/м ³	q_2 м ³ /год	C_2 г/м ³	q_3 м ³ /год	C_3 г/м ³
1	50	20	190	45	120	30
2	100	55	175	60	95	20
3	90	40	185	55	110	15
4	115	60	170	65	130	10

Приклад 3. На опріснювальну установку надходить солоня вода з витратою 10 л/с і солевмістом 10000 мг/л. Із цієї витрати в опріснювач надходить x л/с. З опріснювача виходить $0,75 \cdot x$ л/с прісної води з солевмістом 100 мг/л і $0,25 \cdot x$ л/с розсолу з невідомою концентрацією y . Населенню необхідно постачати воду із солевмістом 500 мг/л. Для цього воду після опріснення змішують з солоною вихідною водою (витрата невідома) в окремому резервуарі. Знайти невідому витрату води і концентрацію розсолу y . Схема опріснювальної установки наведена на рис.13.

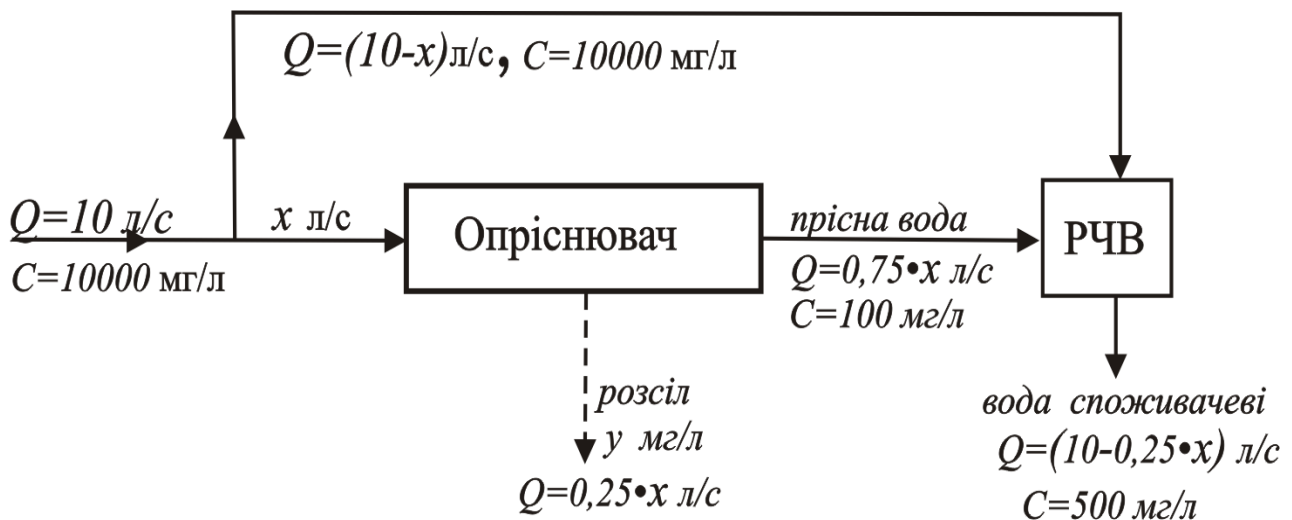


Рис. 1.3 – Схема опріснювальної установки

Розв'язання.

1. Для РЧВ складемо рівняння матеріального балансу за наведеною схемою:

$$\begin{aligned}(10 - x) \cdot 10000 + 0.75 \cdot x \cdot 100 &= (10 - 0.25 \cdot x) \cdot 500 & (1.3) \\ -10000 \cdot x + 125 \cdot x + 75 \cdot x &= 500 - 100000, \\ 9800 \cdot x &= 95000, \\ x &= 9.694.\end{aligned}$$

Із цього рівняння $x=9,694$ л/с.

2. Визначаємо витрату солоної води, поданої у РЧВ:

$$10 - x = 10 - 9.694 = 0.306 \text{ л/с.}$$

3. Витрата прісної води, яка надходить у РЧВ:

$$0.75 \cdot x = 0.75 \cdot 9.694 = 7.27 \text{ л/с.}$$

4. Витрата розсолу, що скидається:

$$0.25 \cdot x = 0.25 \cdot 9.694 = 2.424 \text{ л/с.}$$

5. Подача питної води в місто:

$$10 - 0.25 \cdot x = 10 - 0.25 \cdot 9.694 = 7.576 \text{ л/с.}$$

6. Концентрацію розсолу можна визначити або за рівнянням матеріального балансу всієї системи, або за рівнянням, складеним для опріснювача:

$$\begin{aligned}9.694 \cdot 10000 &= 2.42 \cdot y + 7.27 \cdot 100, \\ y &= 39691.8 \text{ мг/л.}\end{aligned}$$

Таблиця 1.3

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Приточна витрата Q, л/с.	9	9,5	8	10	8,5
Концентрація приточної води C, мг/л.	10500	11000	11200	9800	9500
Витрата прісної води, л/с.	$0,74 \cdot x$	$0,75 \cdot x$	$0,7 \cdot x$	$0,78 \cdot x$	$0,75 \cdot x$
Витрата розсолу, л/с.	$0,26 \cdot x$	$0,25 \cdot x$	$0,3 \cdot x$	$0,22 \cdot x$	$0,25 \cdot x$

РОЗДІЛ 2

Адсорбцію використовують для глибокого очищення води, що підпадає під поняття розведених розчинів. Коефіцієнт розподілу для таких систем вважається сталою величиною:

$$K = a / C = \text{const} , \quad (2.1)$$

де a і c - рівноважні концентрації розподіленої речовини відповідно в адсорбенті і у водному розчині.

Статичною активністю адсорбенту називають максимальну питому кількість поглинутої речовини при певній її рівноважній концентрації в розчині.

Динамічна адсорбція досягається шляхом фільтрування забрудненої води через шар адсорбенту. Динамічна активність адсорбенту визначається середньою в цьому шарі концентрацією адсорбтиву, яка досягається у момент його появи у фільтраті.

Характер перебігу процесу адсорбції в часі залежить від того, в якому режимі - періодичному чи безперервному він реалізується. Розділення режимів на періодичні та безперервні пов'язане перш за все із станом, в якому перебуває в процесі шар адсорбенту: буде він нерухомим чи рухомим.

Періодичні процеси адсорбції з нерухомим адсорбентом доцільні з точки зору використання поглинаючої спроможності адсорбенту і тому доцільно розглянути їх особливості.

Якщо до шару чистого адсорбенту безперервно надходить і рухається в режимі ідеального витискування потік води з певною початковою концентрацією речовини, то через якийсь проміжок часу на першій (лобовій чи фронтальній) ділянці шару адсорбенту встановиться рівновага і поглинання адсорбтиву практично зупиниться. Тому потік "проскакує" через цю ділянку без зміни концентрації, а зона поглинання переміститься в наступний за лобовим шар адсорбенту.

Якби швидкість поглинання була нескінченно великою, адсорбція в

наступних шарах проходила б лише після повного насичення адсорбтивом попередніх шарів. Але через скінченне значення швидкості масопередачі розподіл адсорбтиву за товщиною шару проходить плавно, з утворенням фронту адсорбції. Через деякий скінченний проміжок часу від початку процесу профіль фронту адсорбції стабілізується і стає практично незмінним. Тривалість роботи шару адсорбента до такого насичення його лобової ділянки в періодичному процесі називається періодом формування фронту адсорбції і позначається через τ_ϕ або τ_0 .

Таким чином, зона адсорбції пересувається з часом по всьому шару адсорбенту вглиб з певною плавною зміною концентрації адсорбтиву в зоні. Ця зміна концентрації протікає по-різному для лобової і наступних ділянок шару.

Після закінчення першого періоду формування фронту адсорбції в нерухомому шарі адсорбенту починається другий період - паралельного переносу стаціонарного фронту адсорбції, що характеризується переміщенням незмінного профілю концентрацій за напрямком потоку з деякою постійною швидкістю u .

Починаючи від моменту виходу з шару адсорбенту точки фронту з нульовою концентрацією, що відповідає початку "проскоку" адсорбтиву, завершується період адсорбційної або захисної дії шару.

Така спрощена модель процесу періодичної адсорбції називається *моделлю пошарового (фронтального) відпрацювання шару адсорбенту*.

Ділянка шару адсорбенту довжиною l_0 , на якій здійснюється спадання концентрації адсорбтиву в потоці від початкової до нульової концентрації, називається *працюючим шаром* або *зоною масопередачі*.

Рівняння режиму паралельного переносу з постійною швидкістю фронту адсорбції визначає тривалість τ_{np} (проскоку) захисної дії шару адсорбенту

$$\tau_{np} = (l/u) - \tau_0. \quad (2.2)$$

Слід зауважити, що початком "проскоку" вважається момент, коли вихідна концентрація речовини становить близько 5 % від її початкової

концентрації.

Приклад 2.1 Визначити критичну швидкість псевдорозрідження шару сорбенту в колоні зі зваженим шаром, якщо $\rho_u = 1920 \text{ г/см}^3$, $\rho = 1000 \text{ г/см}^3$, $\rho_i = 0,602$, $a_0 = 8,95 \cdot 10^3$, $\varepsilon = 0,47$.

Розв'язання. Критичну швидкість псевдорозрідження знайдемо за формулою

$$v_k = \frac{R'_{e_3} \cdot \gamma \cdot a_0 \cdot (1 - \varepsilon)}{4} \quad (2.3)$$

де $R'_{e_3} = \frac{Ar_3}{54 \cdot k}$ - ефективний критерій Рейнольдса.

Ефективний критерій Архімеда Ar_3 визначаємо за формулою

$$Ar_3 = \frac{g}{\gamma^2} \left(\frac{b}{a_y} \right)^3 \cdot \frac{\rho_u - \rho}{\rho} \cdot (1 - \rho_i) \cdot \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.4)$$

де ρ_u і ρ - відповідно щільність твердої частки і середовища; ρ_i - пористість зерна; ε - порозність псевдорозрідженого шару; γ - коефіцієнт кінетичної в'язкості; a_y - питома поверхня зерен шару; g - прискорення вільного падіння.

$$Ar_3 = \frac{9/81}{(1,10^{-5})^2} \left(\frac{6}{8,98 \times 10^3} \right)^3 \cdot \frac{1920 - 1000}{1000} \cdot (1 - 0,602) \cdot \frac{0,47^2}{(1 - 0,47)^2} = 396,54$$

$$R'_{e_3} = \frac{396,54}{54 \times 5} = 1,469.$$

Звідки неважко знайти критичну швидкість псевдорозрідження шару сорбенту:

$$v_k = \frac{1,469 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 8,98 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,47)}{4} = 1,753 \cdot 10^{-3} \text{ м/сек} = 10,55 \text{ см/хв.}$$

Таблиця 2.1

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Щільність твердої частки ρ_u , г/см ³	1870	1910	1922	1918	1925
Пористість зерна ρ_i	0,652	0,590	0,599	0,637	0,587
Питома поверхня зерна шару, a_0 , см ³ /см ³	$8,33 \cdot 10^3$	$7,95 \cdot 10^3$	$8,57 \cdot 10^3$	$7,85 \cdot 10^3$	$7,65 \cdot 10^3$

Приклад 2.2. Визначити тривалість захисної дії шару адсорбенту товщиною 1,5 м, якщо швидкість фільтрування 8 м/год. Швидкість переміщення фронту адсорбції становить 0,1 м/год, тривалість формування фронту адсорбції – 2,5 год.

Розв'язання. Тривалість захисної дії шару адсорбенту знаходимо за формулою (2.2):

$$\tau_{np} = (1,5/0,1) - 2,5 = 12,5 \text{ год.}$$

Приклад 2.3. Визначити тривалість захисної дії адсорбенту з нерухомим щільним шаром, якщо висота завантаження становить $H=1,8$ м, вихідна концентрація C_0 нітроаніліну у воді складає 14 моль/м^3 . Завантаження активоване вугілля КАД, адсорбційна ємкість якого $a_0=630 \text{ моль/м}^3$. Кінцева концентрація у воді нітроаніліну – $0,7 \text{ моль/м}^3$. Швидкість фільтрування – 7 м/год.

Розв'язання.

1. Знайдемо коефіцієнт захисної дії шару:

$$K = \frac{a_0}{V \cdot C_0} = \frac{630}{7 \cdot 14} = 6,4 \text{ год/м.}$$

2. Довжину робочої зони приймаємо $l_0 = 0.25$ м, враховуючи умову $0,1H \div 0,2H$ м.

3. Число одиниць переносу ЧОП знаходимо за допомогою графіка:

Задаючись рядом значень C , проміжних між величинами C_n і C_k , будемо

криву залежності $\frac{l}{(C - C_p)}$ від C .

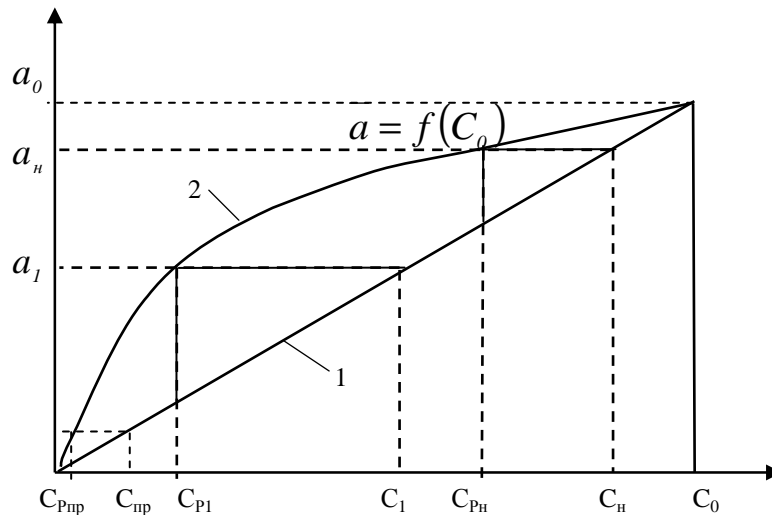


Рис. 2.1 – Побудова теоретичної ступені:

1 – робоча лінія; 2 – ізотерма

Для цього використовуємо ізотерму і робочу лінію (рис. 2.1). За рис. 2.1 для кожної взятої C знаходимо C_p , як це показано на графіку. Отримані значення наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

C	C_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_{\dots}	C_k
$C_p(a)$	$C_{рн}$	$C_{р1}$	$C_{р2}$	$C_{р3}$	$C_{р4}$	$C_{р\dots}$	$C_{рк}$
$C - C_p(a)$	$C_n - C_{рн}$	$C_1 - C_{р1}$	$C_2 - C_{р2}$	$C_3 - C_{р3}$	$C_4 - C_{р4}$	$C_{\dots} - C_{р\dots}$	$C_k - C_{рк}$
$\frac{1}{C - C_p}$	$\frac{1}{C_n - C_{рн}}$	$\frac{1}{C_1 - C_{р1}}$	$\frac{1}{C_2 - C_{р2}}$	$\frac{1}{C_3 - C_{р3}}$	$\frac{1}{C_4 - C_{р4}}$	$\frac{1}{C_{\dots} - C_{р\dots}}$	$\frac{1}{C_k - C_{рк}}$

За даними табл. 2.2 будують криву і визначають ЧОП, як показано на рис. 2.2.

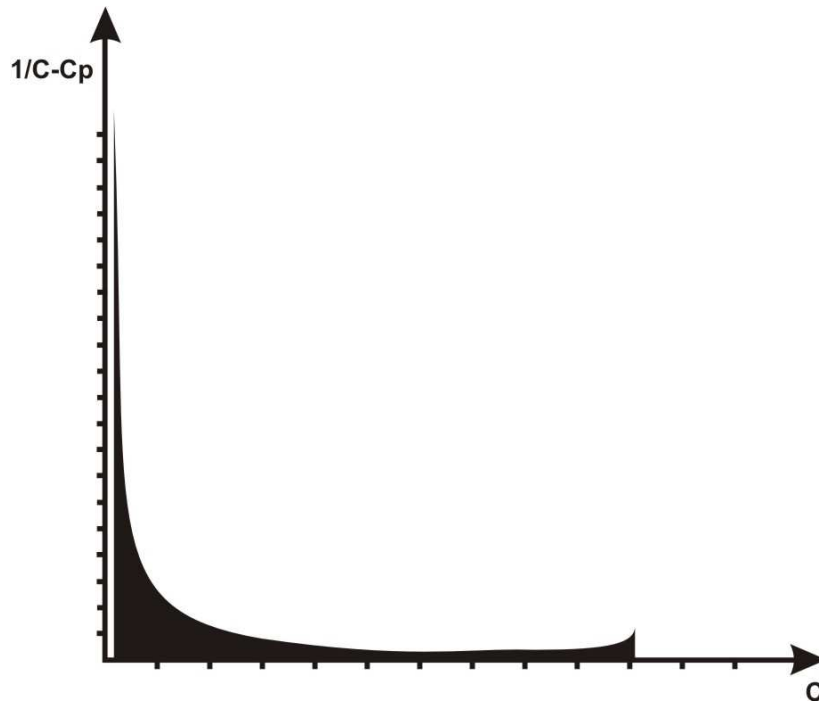


Рис. 2.2 – Визначення числа одиниць переносу методом графічного інтегрування

За рис. 2.2 вимірюємо площу, обмежену кривою, крайніми ординатами, що відповідають C_n і C_k , і віссю абсцис (площа, заштрихована на рис. 2.2). Після цього знаходимо величину інтеграла з урахуванням масштабів M_1 і M_2 , що виражають число одиниць в 1 мм на осі ординат і осі абсцис графіка:

$$\text{ЧОП} = n = \int_{C_k}^{C_n} \frac{dC}{C - C_p} = fM_1M_2 = 11.5 \cdot 0.2 \cdot 2 = 4.6.$$

Визначаємо швидкість руху стаціонарного фронту:

$$U = V \cdot \frac{C_0}{a_0} = 7 \frac{14}{630} = 0.155 \text{ м/год.}$$

4. Ступінь насичення робочої зони в момент проскоку:

$$\psi = \frac{l}{n} = \frac{l}{4.6} = 0.21.$$

5. Час масопередачі $\tau_m = \frac{l_0}{u} = \frac{0.25}{0.155} = 1.61$ год.

6. Визначаємо τ_0 :

$$\tau_0 = \tau_m(1 - \psi) = 1.61 \cdot (1 - 0.21) = 1.27 \text{ год.}$$

7. Визначаємо час захисної дії шару:

$$\tau_{np} = K \cdot H - \tau_0 = 6.4 \cdot 1.8 - 1.27 = 10.25 \text{ год.}$$

8. Визначаємо динамічну ємкість завантаженого вугілля $a_{дин}$ для даних умов:

$$a_{дин} = a_p \left(1 - (1 - \psi) \cdot \frac{l_0}{H} \right) = 630 \cdot \left(1 - 0.79 \cdot \frac{0.25}{1.8} \right) = 560 \text{ моль/м}^3.$$

Таблиця 2.3

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Адсорбційна ємкість a , моль/м ³	680	700	650	720	750
Вихідна концентрація C_0 , моль/м ³	15	14	13	12	14
Кінцева концентрація у воді C_k моль/м ³ .	0,7	0,6	0,8	0,7	0,6
Швидкість фільтрування м/год.	6	7	5	7	8

Приклад 2.4. На натрій-катіонітовий фільтр діаметром 3,4 м, завантажений катіонітом КУ-2-8, подається вода з вихідною загальною жорсткістю $C_0 = 7$ г-екв/м³. Висота завантаження—1,6 м; діаметр зерна катіоніта, $d_k = 0,8$ мм. Продуктивність фільтра 182 м³/год, відповідно швидкість 15 м/год. Концентрація у фільтраті $C_{np} = 0,1$ г-екв/м³. Обмінна ємкість

катіоніта у процесі експлуатації (за відомою повною обмінною ємністю $E_n = 1500$ г-екв/м³) $E_p^{Na} = \bar{C}_0 = 1048$ г-екв/м³. Визначити час фільтрування до заданого значення проскоку - τ , год.

Розв'язання. Час роботи натрій-катіонітового фільтра до проскоку визначаємо за формулою Громогласова:

$$\tau = \frac{h_{cl}}{v \cdot \beta} - \frac{-\ln \varphi - 1}{0.92 \cdot v^{0.5} \cdot d_s^{-1.5} \cdot \beta^{0.5}}, \quad (2.5)$$

де τ - час фільтрування до заданого значення проскоку, ч;

v - швидкість фільтрування, м/год; d_s - діаметр зерна катіоніта, мм;

h_{cl} - висота шару катіоніту, м; $\varphi = C_\phi / C_0$; $\beta = C_0 / q_0$; C_0 і C_ϕ - концентрації іонів відповідно вихідна і у фільтраті; q_0 - концентрація іонів, сорбованих одиницею об'єму катіоніту.

$$\tau = \frac{1.6 \cdot 1048}{15 \cdot 7} - \frac{-\ln \frac{0.1}{7} - 1}{0.92 \cdot 15^{0.5} \cdot 0.8^{-1.5} \cdot 0.007^{0.5}} = 8.1 \text{ год}$$

Таблиця 2.4

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
C_0 - г-екв/м ³ .	5	6	8	7,5	6,3
h_{cl} м;	1,8	1,7	1,5	1,9	1,65
d_k , мм.	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8
Q , м ³ /год.	137	182	182	182	182
C_{np} , г - екв/м ³ .	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
q_0 , г - екв/м ³ .	1000	1100	980	990	1050

Приклад 2.5. Концентрація компонента в газовій фазі $y_n = 4\%$ мас., $y_k = 1\%$ мас. концентрації компонента, що розподіляє, у рідкій

$x_n = 0$, $x_k = 4\%$ фазі мас. Рівняння зв'язку рівноважних концентрацій $y_p = 0,5x$.

Знайти середню рушійну силу процесу (Δy_{cp} , Δx_{cp}), число одиниць переносу маси (m_y , m_x) і відношення масових потоків рідкої і газової фаз L/G для протиточної абсорбції компонента з газової фази (рис. 2.3).

Розв'язання. У координатах y - x будемо рівноважну лінію $y_p = 0,5x$ і робочу $[A(y_k, x_n), B(y_n, x_k)]$.

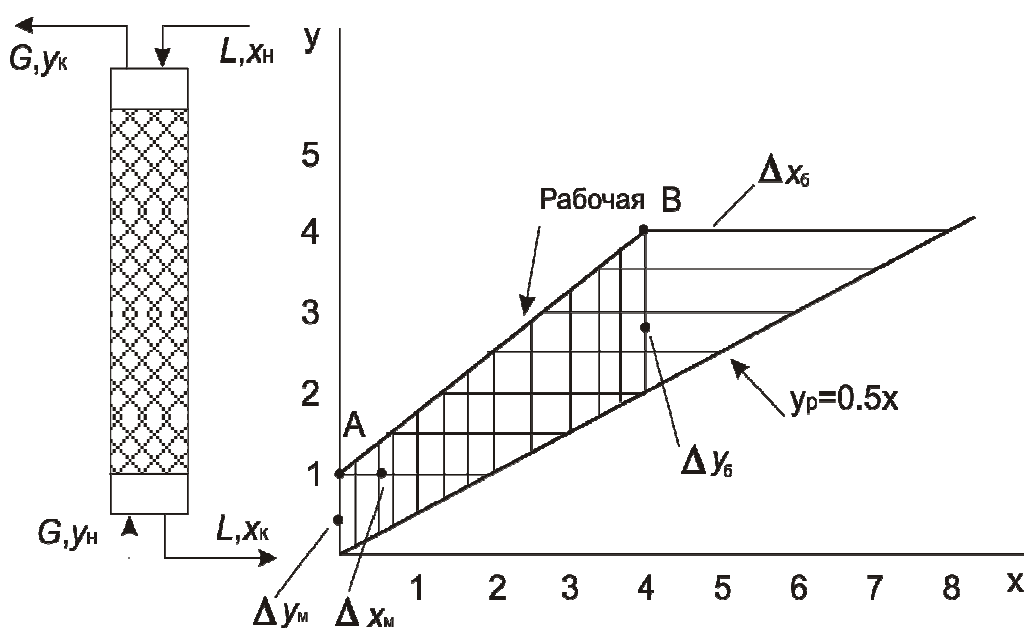


Рис. 2.3 – Принципова схема процесу абсорбції з протилежним рухом взаємодіючих фаз і його зображення на y - x діаграмі

1. Визначення середньої рушійної сили Δy_{cp} :

$$\Delta y_{cp} = \frac{\Delta y_б - \Delta y_м}{2} = \frac{2+1}{2} = 1,5 \text{ \% мас.}$$

2. Визначення середньої рушійної сили Δx_{cp}

$$\Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_б - \Delta x_м}{2} = \frac{4+2}{2} = 3,0 \text{ \% мас.}$$

3. Визначення чисел одиниць переносу маси

$$m_y = \frac{y_H - y_K}{\Delta y_{cp}} = \frac{4-1}{1,5} = 2; \quad m_x = \frac{x_K - x_H}{\Delta x_{cp}} = \frac{4-0}{3} = 1,33.$$

4. Визначення L/G (з матеріального балансу)

$$L(x_K - x_H) = G(y_H - y_K)$$

$$\frac{L}{G} = \frac{y_H - y_K}{x_K - x_H} = \frac{4-1}{4-0} = 0,75.$$

Таблиця 2.5

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Концентрація компонента, у газовій фазі y_H y_K %, мас.	$y_H=4,5\%$ $y_K = 1\%$	$y_H=5\%$ $y_K = 1\%$	$y_H=4,2\%$ $y_K = 1\%$	$y_H=4,8\%$ $y_K = 1\%$	$y_H=5,5\%$ $y_K = 1\%$
Концентрація компонента, у рідкій фазі $x_H = 0$, $x_K = 4$ % мас.	$x_K=4.5\%$	$x_K=5\%$	$x_K=4.3\%$	$x_K=4\%$	$x_K=5.5\%$
Ізотерма	$y_p = 0,5x$	$y_p = 0,5x$	$y_p = 0,5x$	$y_p = 0,5x$	$y_p = 0,5x$

Приклад 2.6. За даними, наведеними в табл. 2.6, визначити динамічні характеристики фільтруючого шару, тобто знайти: коефіцієнт захисної дії шару K , хв/см, довжину робочої зони - l_0 , см.; період масопередачі - τ_M , період втраченого часу захисної дії шару- τ_0 , період формування адсорбційного фронту- τ_ϕ .

Таблиця 2.6

Час проскоку τ_{np} , хв	10	36	108	234	400	485
Довжина шару L , см	2	4	8	12	16	18

Розв'язання. За даними, наведеними в табл. 2.6, побудувати залежність $L-\tau_{np}$, як це показано на рис.2.4.

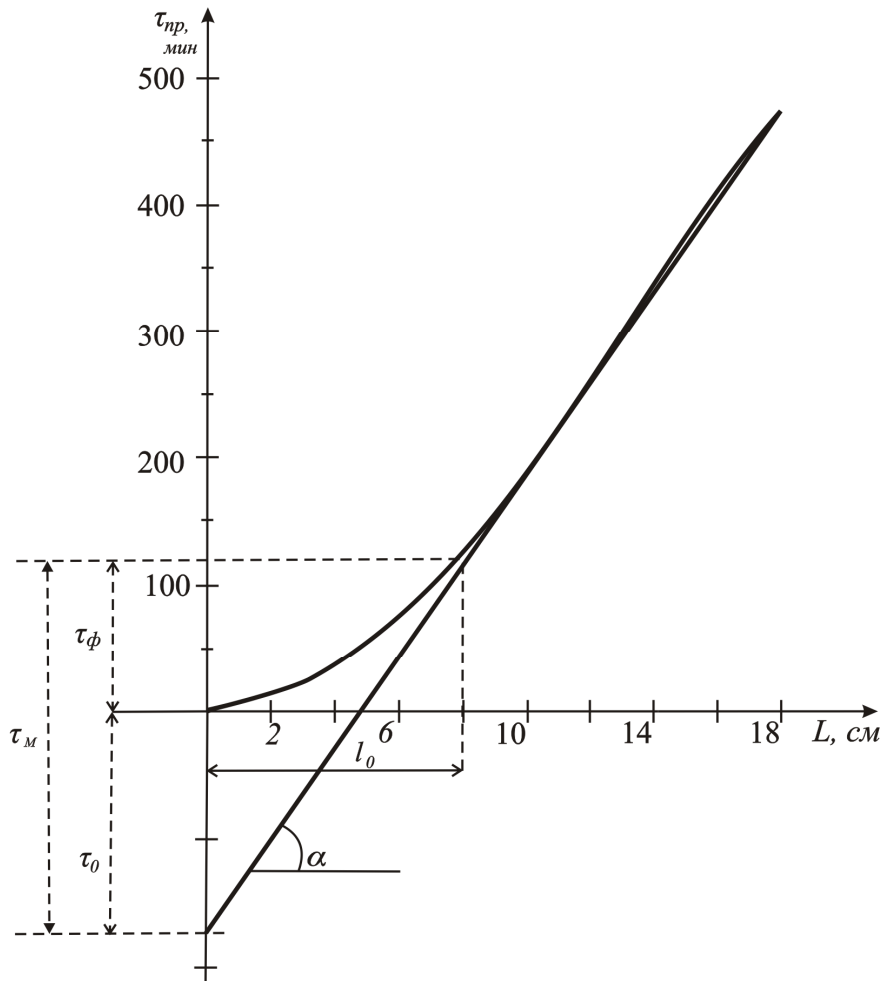


Рис. 2.4 – Графічна інтерпретація зв'язку $L-\tau_{np}$

Провести дотичну лінію під кутом α , як показано на рис. 2.4. За побудованим графіком визначаємо невідомі динамічні характеристики фільтруючого шару.

1. Знаходимо коефіцієнт захисної дії шару K :

$$L_1 = 5 \text{ см}; L_2 = 8 \text{ см.}$$

$$K = \frac{l}{u} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{t_{np}}{L_2 - L_1} = \frac{110}{8 - 5} = 36,7 \text{ хв/см};$$

2. За рис. 2.4 знаходимо τ_0 і τ_ϕ :

$$\tau_0 = 175 \text{ хв.}, \tau_\phi = 108 \text{ хв.}$$

3. Знаходимо час масопередачі й довжину робочої зони τ_m , l_0 :

$$l_0 = 8 \text{ см}; \tau_m = \tau_\phi + \tau_0 = 175 + 115 = 290 \text{ хв.}$$

Таблиця 2.7

Номери варіантів	Вихідні дані						
	1	$L, \text{см}$	1	3	4	5	6
$\tau_{np}, \text{хв}$		12	38	72	110	270	500
2	$L, \text{см}$	6	8	10	14	16	18
	$\tau_{np}, \text{хв}$	8	11	32	100	193	284
3	$L, \text{см}$	2	3	4	6	7	8
	$\tau_{np}, \text{хв}$	14	32	58	170	250	330
4	$L, \text{см}$	2	4	8	12	16	18
	$\tau_{np}, \text{хв}$	12	38	110	236	410	495

**Визначення дози активованого вугілля
для різних схем адсорбційного очищення природних вод**

Приклад 2.7 Використовуючи ізотерму адсорбції, знайти дозу адсорбенту для прямої установки, якщо початкове значення біхроматної окислюваності у воді становить 25 мгО/дм^3 , а після очищення 10 мгО/дм^3 . На рис. 2.5 показані ізотерма і робоча лінія.

Розв'язання. Для даної прямої установки дозу активованого вугілля обчислюємо за формулою

$$D = \frac{C_0 - C_k}{a_k}, \quad (2.6)$$

де C_0 – початкове значення біхроматної окислюваності, мг/дм^3 , $C_0 = 25 \text{ мг/дм}^3$;

C_k – кінцеве значення біхроматної окислюваності, мг/дм^3 ;

$C_k = 10 \text{ мг/дм}^3$;

a_k – величина адсорбції, визначається за відповідним рисунком.

Для даної прямоточної установки дозу активованого вугілля БАУ (a_k – визначаємо за рис. 2.5:

$$D = \frac{25-10}{4} = 3,75 \text{ г/дм}^3.$$

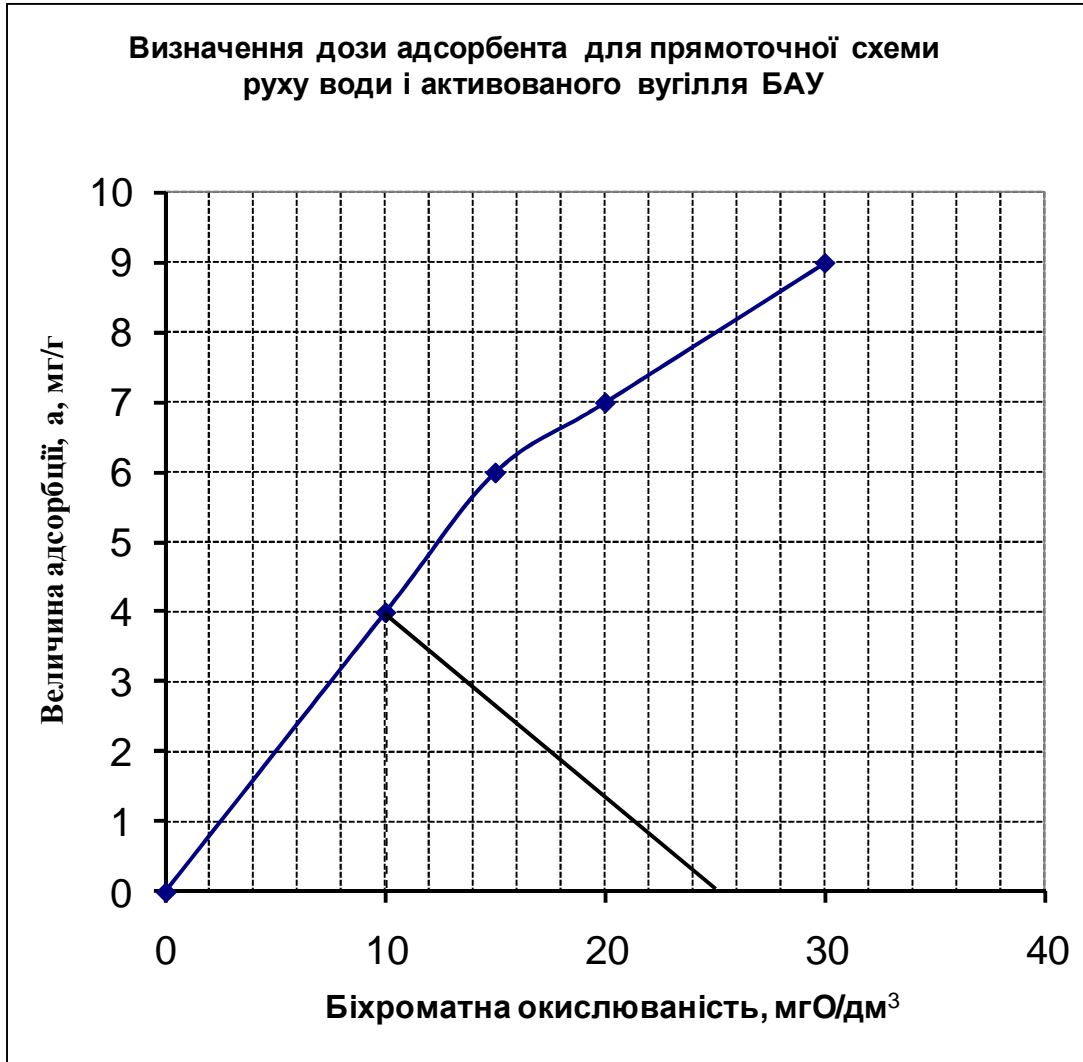


Рис. 2.5 – Визначення дози адсорбенту для установки з прямоточним рухом води і активного вугілля БАУ.

Приклад 2.8. Використовуючи ізотерму адсорбції активованого вугілля БАУ, знайти дозу адсорбенту для протиточної установки, необхідну для очищення води від органічних речовин, обумовлених за біхроматною окислюваністю з 25 до 10 мгО/дм³, як показано на рис. 2.6.

Розв’язання. Для двоступеневої установки доза активованого вугілля на першій ступені обчислюється за формулою

$$D_1 = \frac{C_0 - C_1}{a_k - a_2}, \quad (2.7)$$

на другій ступені:

$$D_2 = \frac{C_1 - C_k}{a_2}, \quad (2.8)$$

де C_0 – початкове значення біхроматної окислюваності, мг/дм³; $C_0 = 25$ мг/дм³;

C_1 – проміжне значення біхроматної окислюваності, мг/дм³ чи кінцеве для першої ступені, визначається за відповідним рисунком;

C_k – кінцеве значення біхроматної окислюваності, мг/дм³; $C_k = 10$ мг/дм³;

a_k, a_2 – величина адсорбції, визначається за відповідним рисунком, мг/г.

Загальна доза активованого вугілля для двохступеневої адсорбційної установки з рухом фаз у протилежних напрямках визначається за формулою

$$D_{заг} = \frac{C_0 - C_k}{a_1}. \quad (2.9)$$

Таким чином, загальна доза активованого вугілля БАУ складе:

$$D_{заг} = \frac{25 - 10}{6,8} = 2,21 \text{ г/дм}^3.$$

Таблиця 2.8

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Початкове значення біхроматної окислюваності C_0 , мг/дм ³ ;	22	23	26	30	28
Кінцеве значення біхроматної окислюваності, C_k мг/дм ³ ;	5	12	8	10	11



Рис. 2.6 – Визначення дози адсорбенту для двоступеневої установки з рухом води і активованого вугілля БАУ у протилежних напрямках

Приклад 2.9. Використовуючи ізотерму адсорбції активованого вугілля АГ-3, знайти дозу адсорбенту для триступінчастої установки з перехресним рухом активованого вугілля і води, яка необхідна для очищення води від органічних речовин, обумовлених за біхроматною окислюваністю з 25 до 10 мгО/дм³, як показано на рис. 2.7.

Розв’язання. Для даної триступінчастої установки доза активованого вугілля на першій ступені обчислюється за формулою

$$D_1 = \frac{C_0 - C_1}{a_1}, \quad (2.10)$$

на другій ступені

$$D_2 = \frac{C_1 - C_2}{a_2}, \quad (2.11)$$

на третій ступені:

$$D_3 = \frac{C_2 - C_k}{a_k}, \quad (2.12)$$

де C_0 – початкове значення біхроматної окислюваності, мг/дм³;
 $C_0 = 25$ мг/дм³;

C_1 - проміжне значення біхроматної окислюваності, мг/дм³, чи кінцеве для першої ступені, визначається за рис. 2.7; C_2 - проміжне значення біхроматної окислюваності, мг/дм³, чи кінцеве для другої ступені, визначається за рисунком; C_k – кінцеве значення біхроматної окислюваності, мг/дм³; $C_k = 10$ мг/дм³; a_k, a_1, a_2 – величини адсорбції, мг/г, визначаються за рис.2.7.

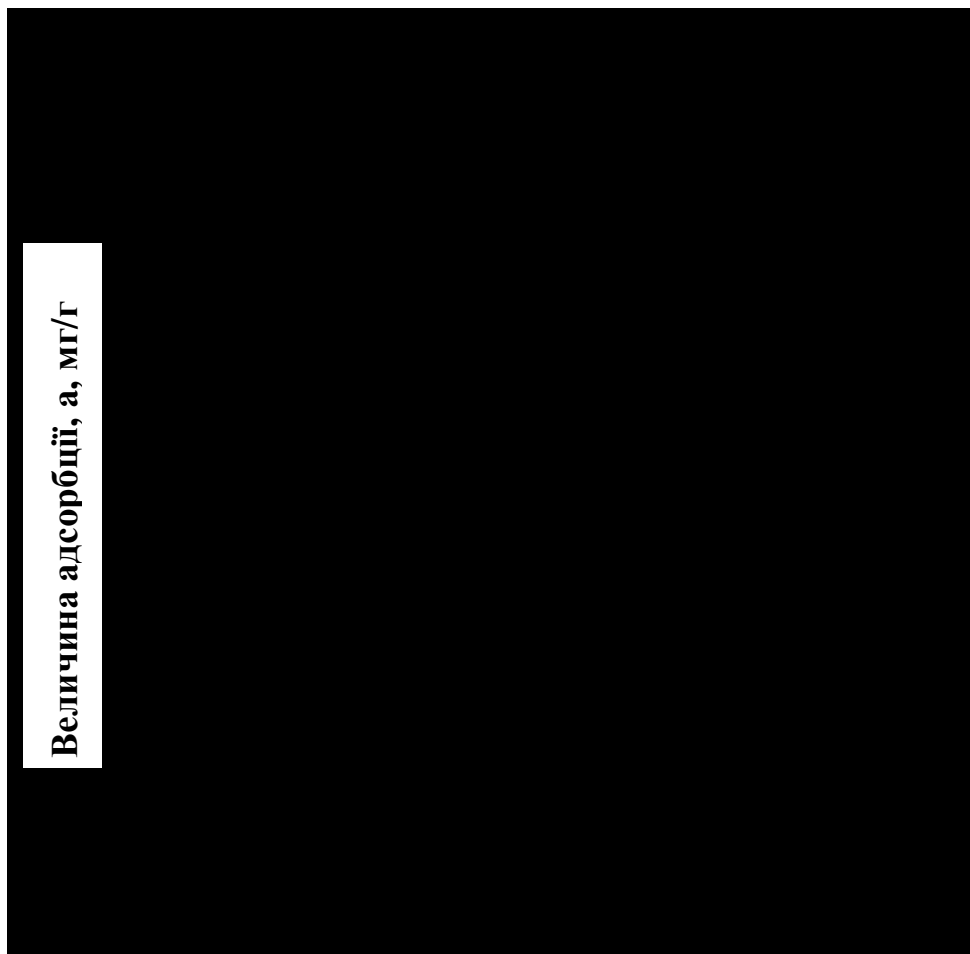


Рис. 2.7 – Визначення дози адсорбенту для триступеневої установки з перехресним рухом води і активованого вугілля АГ-3

Для даного випадку доза активованого вугілля АГ-3 на першій ступені (a_k – визначаємо за рис. 2.7):

$$D_1 = \frac{25 - 18}{5,6} = 1,25 \text{ г/дм}^3;$$

на другій ступені:

$$D_2 = \frac{18 - 13}{4,2} = 1,19 \text{ г/дм}^3;$$

на третій ступені:

$$D_3 = \frac{13 - 10}{3} = 1 \text{ г/дм}^3.$$

Таким чином, загальна доза активованого вугілля АГ-3 складе:

$$D_{\text{заг}} = 1,25 + 1,19 + 1 = 3,44 \text{ г/дм}^3.$$

Таблиця 2.9

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Початкове значення біхроматної окислюваності C_0 , мг/дм ³ ;	26	27	29	30	25
Кінцеве значення за біхроматною окислюваністю, C_k мг/дм ³ ;	8	10	9	11	8

РОЗДІЛ 3

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Вивчення сорбційних властивостей різних адсорбентів і побудова ізотерм адсорбції

Мета роботи: Побудова ізотерм адсорбції і вивчення адсорбційних властивостей різних марок вугілля.

Вихідним рівнянням адсорбційної рівноваги є рівняння матеріального балансу речовини, яке можна записати в такий спосіб:

$$qa_1^* + QC_1^* = QC_0 \quad (3.1)$$

чи

$$\frac{a_1^*}{C_0 - C_1^*} = \frac{Q}{q} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.2)$$

де q – витрата адсорбенту, поданого в стічну воду, г/год; Q – витрата оброблюваних стічних вод, $\text{дм}^3/\text{год}$; C_0 – початкова концентрація забруднень у стічній воді, $\text{мг}/\text{дм}^3$; a_1^* і C_1^* – рівноважні концентрації забруднень відповідно в адсорбенті, $\text{мг}/\text{г}$, і у воді, $\text{мг}/\text{дм}^3$ на виході із ступені.

Графічно процес адсорбції в апараті зображений на рис 3.1, з якого випливає, що співвідношення (3.1) являє собою тангенс кута нахилу лінії, що з'єднує точки початку процесу адсорбції і його завершення. Такі лінії, як відомо, прийнято називати робочими, а одночасну зміну концентрацій від вихідних (C, a_0) до рівноважних (C_1^*, a_1^*) значень – теоретичним ступенем адсорбції.

Очевидно, що співвідношення (3.2) справедливе у всьому діапазоні зміни концентрацій у двох фазах від початкових до кінцевих значень. Тому,

вирішуючи рівність (3.2) відносно a_1^* , одержуємо рівняння робочої лінії одноступеневої адсорбції:

$$a_1^* = -\frac{Q}{q}C_1^* + \frac{Q}{q}C_0 \quad (3.3)$$

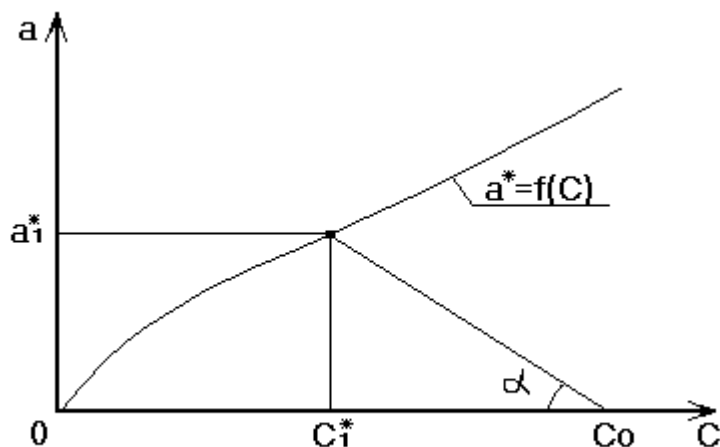


Рис. 3.1 – Графічне зображення адсорбції для рівноважних умов

Як впливає з рис. 3.1, нахил робочої лінії визначає дозу адсорбенту, поданого у стічну воду, і ступінь концентрування речовин в адсорбенті.

Для практичних оцінок повноти вилучення речовин можна ввести поняття про ступінь вилучення (фактор адсорбції), що являє собою відношення кількості речовини, що перейшла в адсорбент, до кількості речовини, що залишилася в розчині після адсорбції. Для одноступеневої адсорбції при $a_0 = 0$ маємо:

$$A = \frac{qa_1^*}{QC_1^*} \quad (3.4)$$

Якщо лінія рівноваги (ізотерма адсорбції) пряма з тангенсом кута нахилу

$$K = \frac{a^*}{C^*} ,$$

тобто справедливий лінійний закон розподілу, то фактор адсорбції запишеться в такий спосіб:

$$A = \frac{Kq}{Q}. \quad (3.5)$$

З цього виразу фактор адсорбції можна визначити як відношення нахилів ліній рівноваги до робочої лінії. Спільний же розгляд двох рівнянь (рівноваги і робочої лінії) приводить до співвідношення

$$QC_0 = QC_1^* + KqC_1^* \quad (3.6)$$

чи

$$C_1^* = \frac{Q}{Q + Kq} C_0. \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.7) дозволяє безпосередньо обчислити концентрацію компонента, що вилучається з рідини після адсорбції. Однак усі наведені вище міркування справедливі для теоретичної (ідеальної) ступені адсорбції, коли рідина і адсорбент, виходячи з апарату, знаходяться в хімічній рівновазі.

Методика проведення лабораторних досліджень і побудова ізотерми адсорбції.

Приготування реактивів.

1. Розчин біхромату калію (0,25н), який відтитрували. Біхромат калію - $K_2Cr_2O_7$ (масою 12,258 г), попередньо висушений протягом 2 годин при температурі 105^0 С, розчиняють у дистильованій воді і доводять розчин до 1 дм^3 .
2. Сіль Мора (0,25н) у кількості 98 г розчиняють у дистильованій воді, додають 20 мл сірчаної кислоти (H_2SO_4) і доводять до 1 дм^3 . Сірчана кислота концентрована (щільність $1,84 \text{ г/см}^3$).

Хід аналізу.

1. Відбирають досліджувану воду у 3 колби по 250 мл. Із двох колб відбирають по 10 мл стічної води і по 10 мл дистильованої води, а в третю - 20 мл дистильованої води.
2. Додають по 10 мл $K_2Cr_2O_7$ - біхромат калію (0,25н) і 30 мл концентрованої сірчаної кислоти, ретельно перемішуючи суміш після кожного разу.
3. Колби закривають пробкою, яка з'єднана зі зворотним холодильником, і кип'ятять протягом двох годин (контрольна проба - 0,5 год.).
4. Охолоджують колби і переносять суміш кожної колби в конічну колбу на 500 мл, відмиваючи кілька разів стінки першої колби дистильованою водою. Доводять об'єм розчину дистильованою водою до 300 мл.
5. Додають 5 крапель N-фенілантранілової кислоти, 3 краплі розчину фероїну, титрують розчином солі Мора до переходу фарбування у смарагдовий колір.

Визначення титру (додаткове титрування): відбирають 25 мл розчину біхромату калію і доводять обсяг до 150 мл дистильованою водою, додають 20 мл концентрованої сірчаної кислоти і дають охолонути. Додають 10 крапель фенілантранілової кислоти і титрують розчином солі Мора.

Розрахунок. Величину адсорбції розраховують в такий спосіб:

$$a = (C_0 - C_k) \frac{V}{m}, \quad (3.8)$$

де C_0 – початкова концентрація забруднень у стічній воді, мг/дм³;
 C_k – рівноважна концентрація забруднень у стічній воді і активному вугіллі, визначається за формулою

$$C_k = (V_1 - V_2) \cdot K \cdot 200 - 0,23C_{Cl}, \quad (3.9)$$

де V_1 – об'єм солі Мора, витрачений на титрування контрольної проби, дм³;
 V_2 – об'єм солі Мора, що йде на титрування досліджуваної проби, дм³;

K – поправочний коефіцієнт, визначається додатковим титруванням; C_{Cl} – концентрація хлоридів у досліджуваній пробі, мг/дм³; V – об’єм досліджуваної проби, дм³; m – маса навішення активованого вугілля, мг.

Для побудови ізотерми адсорбції активованого вугілля АГ-3 на воді загального виходу КБО «Безлюдівський» проводили наступні розрахунки:

- Точка 1:

$$C_1 = 0,15 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 11,72 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_1 = (72 - 11,72) \frac{0,1}{1,5} = 4,019 \text{ мг/г.}$$

- Точка 2:

$$C_2 = 0,2 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 21,76 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_2 = (72 - 21,76) \frac{0,1}{1} = 5,024 \text{ мг/г.}$$

- Точка 3:

$$C_3 = 0,3 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 41,84 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_3 = (72 - 41,84) \frac{0,1}{0,5} = 6,032 \text{ мг/г.}$$

- Точка 4:

$$C_4 = 0,4 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 61,92 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_4 = (72 - 61,92) \frac{0,1}{1,5} = 6,72 \text{ мг/г.}$$

На рис. 3.2 показана ізотерма адсорбції активованого вугілля АГ-3 на воді загального виходу КБО «Безлюдівський».

Величина адсорбції, а, мг/г

Рис. 3.2 – Ізотерма адсорбції активованого вугілля АГ-3 на воді загального виходу КБО «Безлюдівський»

Аналогічно для побудови ізотерми адсорбції активованого вугілля КАД на воді загального виходу КБО «Безлюдівський» проводилися наступні розрахунки:

- Точка 1:

$$C_1 = 0,15 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 11,72 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_1 = (72 - 11,72) \frac{0,1}{1,5} = 4,019 \text{ мг/г.}$$

- Точка 2:

$$C_2 = 0,2 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 21,76 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_2 = (72 - 21,76) \frac{0,1}{1} = 5,024 \text{ мг/г.}$$

• Точка 3:

$$C_3 = 0,25 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 31,8 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_3 = (72 - 31,8) \frac{0,1}{0,65} = 6,18 \text{ мг/г.}$$

• Точка 4:

$$C_4 = 0,3 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 41,84 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_4 = (72 - 41,84) \frac{0,1}{0,45} = 6,7 \text{ мг/г.}$$

• Точка 5:

$$C_5 = 0,35 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 51,88 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_5 = (72 - 51,88) \frac{0,1}{0,3} = 6,7 \text{ мг/г.}$$

• Точка 6:

$$C_6 = 0,4 \cdot 1,004 \cdot 200 - 0,23 \cdot 80 = 61,92 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_6 = (72 - 61,92) \frac{0,1}{0,15} = 6,72 \text{ мг/г.}$$

На рис. 3.3 показана ізотерма адсорбції активованого вугілля КАД на воді загального виходу КБО «Безлюдівський».

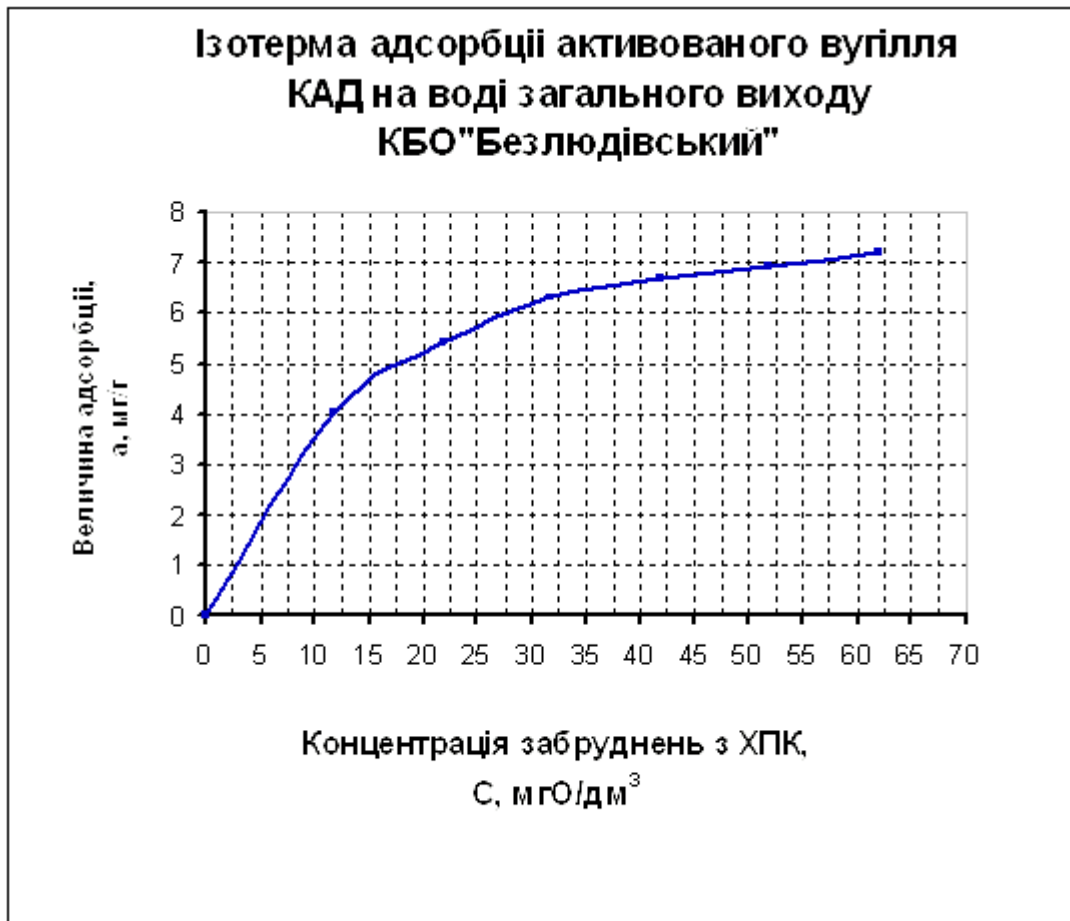


Рис. 3.3 – Ізотерма адсорбції активованого вугілля КАД на воді загального виходу КБО «Безлюдівський»

Аналогічно для побудови ізотерми адсорбції активованого вугілля Filtrosorb-400 води загального виходу КБО «Безлюдівський» проводили такі розрахунки:

- Точка 1:

$$C_1 = 0,1 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 81 = 1,056 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_1 = (53 - 1,056) \frac{0,1}{1} = 5,194 \text{ мг/г};$$

$$a'_1 = (53 - 1,056) \frac{0,1}{0,25} = 4,156 \text{ мг/г}.$$

- Точка 2:

$$C_2 = 0,15 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 81 = 10,899 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_2 = (53 - 10,899) \frac{0,1}{0,65} = 6,477 \text{ мг/г}.$$

- Точка 3:

$$C_3 = 0,2 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 81 = 20,742 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_3 = (53 - 20,742) \frac{0,1}{0,45} = 7,168 \text{ мг/г.}$$

- Точка 4:

$$C_4 = 0,25 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 81 = 30,585 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_4 = (53 - 30,585) \frac{0,1}{0,3} = 7,47 \text{ мг/г.}$$

- Точка 5:

$$C_5 = 0,3 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 81 = 40,658 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_5 = (53 - 30,585) \frac{0,1}{0,15} = 8,228 \text{ мг/г.}$$

На рис. 3.4 показана ізотерма адсорбції активованого вугілля Filtrosorb-400 на воді загального виходу КБО «Безлюдівський».

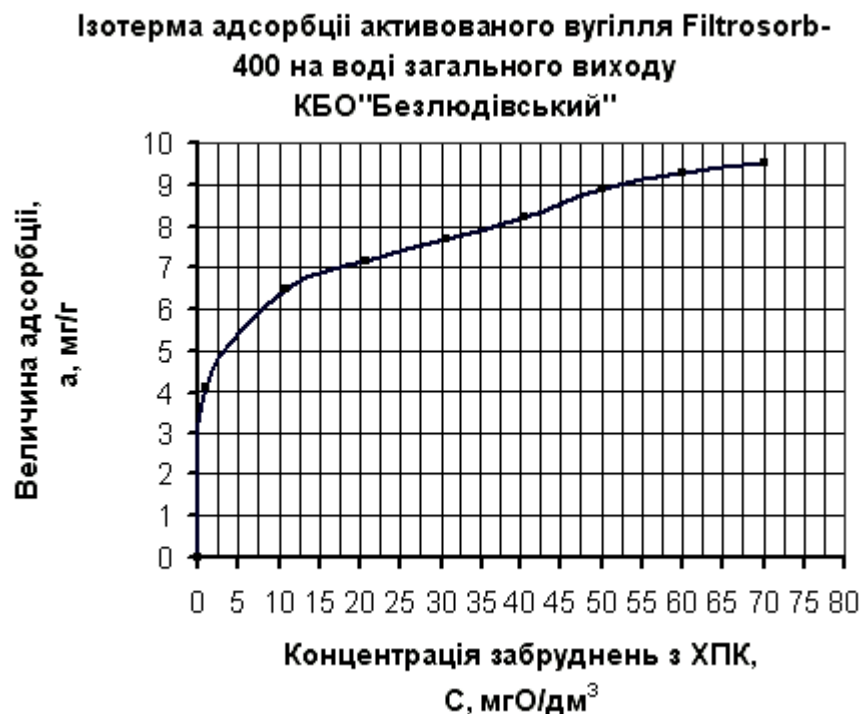


Рис. 3.4– Ізотерма адсорбції активованого вугілля Filtrosorb-400 на воді загального виходу КБО «Безлюдівський»

Аналогічно для побудови ізотерми адсорбції А500 PS проводили такі розрахунки:

- Точка 1:

$$C_1 = 0,2 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 84 = 20,052 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_1 = (69 - 20,052) \frac{0,1}{1,5} = 3,263 \text{ мг/г.}$$

- Точка 2:

$$C_2 = 0,25 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 84 = 29,895 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_2 = (69 - 29,895) \frac{0,1}{1} = 3,911 \text{ мг/г.}$$

- Точка 3:

$$C_3 = 0,3 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 84 = 39,738 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_3 = (69 - 39,738) \frac{0,1}{0,65} = 4,502 \text{ мг/г.}$$

- Точка 4:

$$C_4 = 0,35 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 84 = 49,581 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_4 = (69 - 49,581) \frac{0,1}{0,4} = 4,85 \text{ мг/г.}$$

- Точка 5:

$$C_5 = 0,4 \cdot 0,9843 \cdot 200 - 0,23 \cdot 84 = 59,424 \text{ мг/дм}^3;$$

$$a_5 = (69 - 59,424) \frac{0,1}{0,2} = 4,788 \text{ мг/г.}$$

На рис. 3.5 показана ізотерма адсорбції А500 PS на воді загального виходу КБО «Безлюдівський».



Рис. 3.5 – Ізотерма адсорбції вугілля А 500 PS на воді загального виходу КБО “Безлюдівський”

На рис. 3.6 показано порівняльну характеристику адсорбентів, яка необхідна для вибору адсорбенту для доочищення стічних вод.

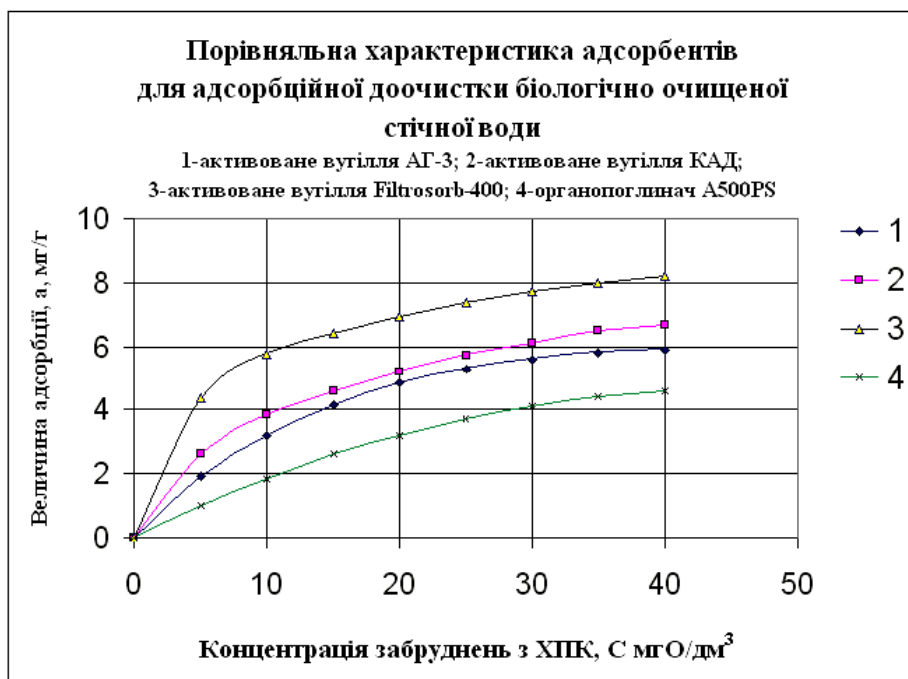


Рис. 3.6– Порівняльна характеристика адсорбентів

Висновки. З рис. 3.6 видно, що найкращим адсорбентом є активоване вугілля Filtrosorb-400.

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте рівновагу при адсорбції.
2. Розкрийте принцип побудови ізотерми адсорбції.
3. Що впливає на вид ізотерми, її форму?
4. Загальні характеристики адсорбентів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Визначання часу захисної дії сорбційного фільтра і коефіцієнта масопередачі

Мета роботи: Визначити час захисної дії сорбційного фільтра та коефіцієнт масопередачі

Основні положення. Адсорбція розчинених речовин при фільтруванні рідин крізь щільний шар зерен адсорбенту, завантажених у колону, є одним з найпоширеніших методів вилучення речовин з розчину, розділу сумішей. Адсорбційне фільтрування широко використовується і в технології глибокого очищення промислових стічних вод від органічних забруднень.

Потік рідини, що містить розчинену речовину в концентрації C_0 , при адсорбційному фільтруванні надходить у шар пористих зерен і обмиває їх, заповнюючи міжзернові порожнечі шару адсорбенту. У результаті масопереносу розчиненої речовини до зовнішньої межі зерен адсорбенту і від зовнішньої межі зерна по системі пор до його центру молекули речовини адсорбуються і концентрація розчину в міру його просування уздовж шару падає від C_0 до 0 або до гранично припустимої концентрації адсорбуючої речовини у фільтраті, обумовленої технічними і санітарно-гігієнічними нормами. Після того як концентрація речовини у фільтраті перевищить гранично припустиме значення, адсорбційний фільтр зупиняють на регенерацію. Таким чином, у рідині, що заповнює міжзернові порожнечі адсорбційного фільтра, концентрація у момент проскоку речовини у фільтрат змінюється від C_0 на вході в шар адсорбенту до C_{np} на виході із шару адсорбенту. Також поступово, починаючи від вхідного перетину, збільшується насиченість сорбенту речовиною, яку вилучають з води. Після закінчення деякого часу спочатку перший шар, а потім і наступні шари завантаження перестануть витягувати з води забруднюючу речовину. При

цьому концентрація речовини у фільтраті, що виходить з цих шарів, буде дорівнювати первісному вмісту її у воді, яка надходить до фільтра з концентрацією C_0 . Для таких повністю насичених шарів ця концентрація C буде в рівновазі із граничною ємкістю сорбенту a_0 в даних умовах.

Швидкість руху рідини уздовж зерен адсорбенту у фільтруючому шарі визначається середньою швидкістю фільтрування:

$$V = Q/F_{\phi} , \quad (4.1)$$

де Q - об'ємна витрата рідини в одиницю часу, м/с; F_{ϕ} - площа фільтра, м².

Для розрахунку сорбційних фільтрів використовується закономірність, сформульована Шиловим М.А.:

$$T = k \cdot H - \tau , \quad (4.2)$$

де T - час захисної дії сорбційного фільтра; H - висота завантаження (при декількох послідовно працюючих фільтрах H являє собою загальну висоту завантаження усіх фільтрів); k - коефіцієнт захисної дії; τ - втрата часу захисної дії. Значення k визначається за формулою

$$k = \frac{a_0}{V \cdot C_0} , \quad (4.3)$$

де a_0 - рівноважна з концентрацією C_0 гранична насиченість сорбенту, V - швидкість фільтрування; C_0 - концентрація забруднюючої речовини у вихідній воді. Величину a_0 знаходять за ізотермою сорбції, (рис. 3.7).

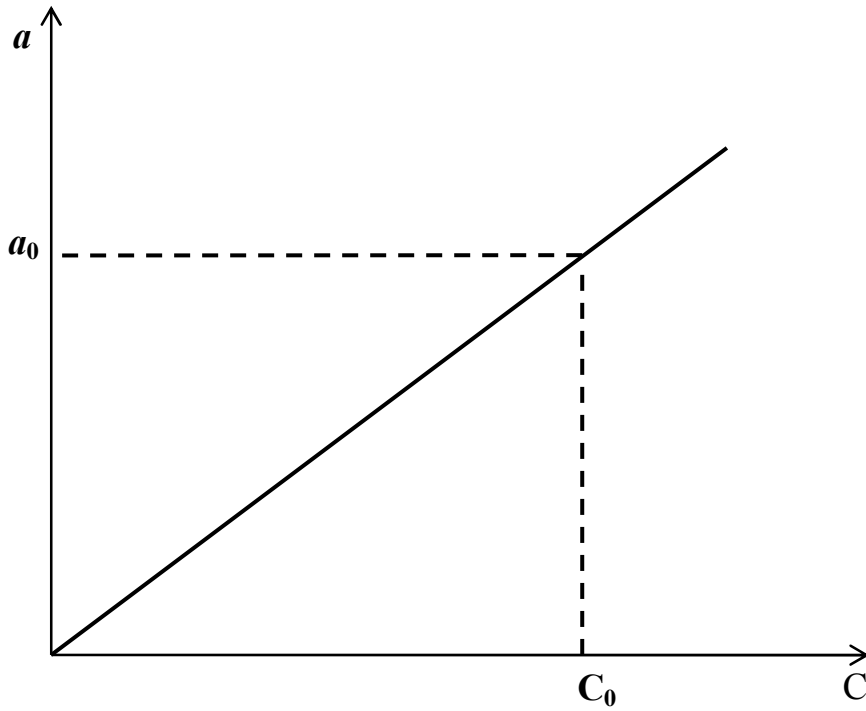


Рис.3.7 – Ізотерма адсорбції органічних забруднень.

Ізотерму сорбції одержують шляхом перемішування оброблюваної води із сорбентом протягом певного часу і наступного відділення сорбенту від води в результаті відстоювання, подальшого фільтрування і визначення вмісту речовини у фільтраті. При досить тривалому перемішуванні води із сорбентом (декілька годин) значення C і a будуть рівноважними. Важливо, щоб експериментальна ізотерма включала можливо більший діапазон рівноважних концентрацій сорбенту в очищеній рідині.

Втрата часу захисної дії:

$$\tau = \varepsilon \cdot \Delta\tau \quad (4.4)$$

де ε – порозність сорбенту

$$\varepsilon = 1 - \delta_n / \delta_k, \quad (4.5)$$

де δ_n – насипна щільність сорбенту $\text{м}^3 / \text{м}^3$.

δ_k – гадана щільність сорбенту $\text{м}^3 / \text{м}^3$.

$\Delta\tau$ – час, протягом якого концентрація речовини у фільтраті змінюється від концентрація сорбенту при припустимому проскакуванні C_{np} до C_0 .

Більш точніше $\Delta\tau$ визначається за вихідною кривою, тобто кривою залежності концентрації даної забруднюючої речовини у фільтраті від часу роботи фільтра. Така крива встановлюється експериментальним шляхом при заповненні експериментального фільтра пропонованим до використання сорбентом і фільтруванні через нього рідини.

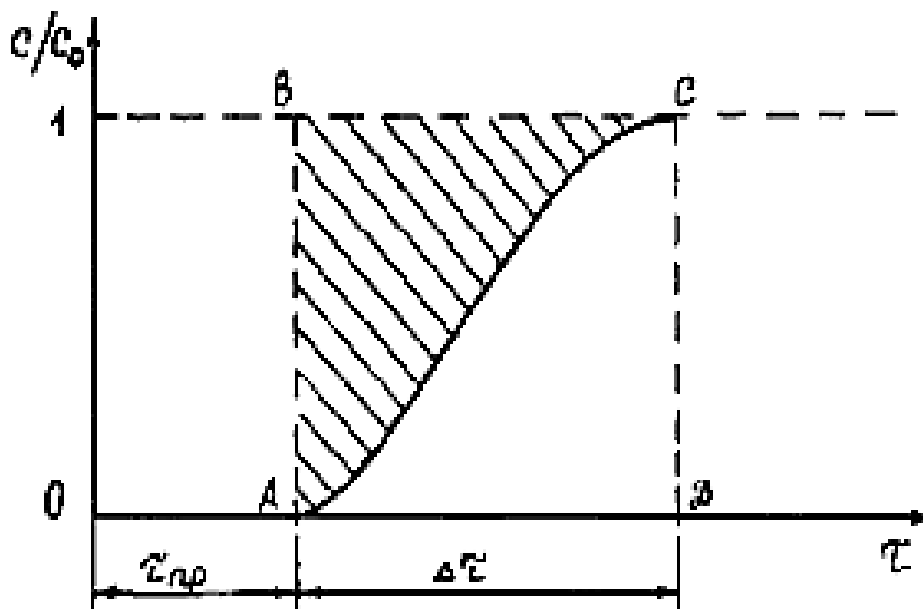


Рис. 3.8 – Вихідна крива динаміки сорбції:

τ_{np} - момент часу, при якому настає проскакування речовини у фільтраті, с.

$\tau = \tau_{np} + \Delta\tau$ - час повного відпрацювання завантаженого шару, с.

Час роботи шару до насичення його лобової ділянки в періодичному процесі адсорбції називається періодом формування фронту адсорбції і позначається як τ_ϕ .

По закінченні першого періоду формування фронту адсорбції в нерухомому шарі адсорбенту починається другий період – паралельного переносу стаціонарного фронту адсорбції, що характеризується переміщенням незмінного профілю концентрацій по напрямку потоку з деякою постійною швидкістю u .

$$u = V \cdot \frac{C_0}{\varepsilon C_0 + a_0} \quad (4.6)$$

Кількість речовини M , що поглинається в зоні масопередачі, може бути визначена за допомогою рівняння масопередачі. Тому що поверхня контакту фаз у цьому випадку практично невизначена, використовують рівняння масопередачі, виражене через об'єм $V_0 = Sl_0$ зони масопередачі

$$M = K_{yv} \cdot Sl_0 \Delta Y_{cp} \tau_m, \quad (4.7)$$

де K_{yv} - об'ємний коефіцієнт масопередачі; τ_m - час проходження фронту адсорбції по зоні масопередачі. Приймаємо $\tau_m = \tau_{np}$. ΔY_{cp} - середня рухома сила масопередачі

$$\Delta Y_{cp} = \frac{0.9 C_0}{n_{0y}}, \quad (4.8)$$

де n_{0y} - загальне число одиниць переносу по рідкій фазі:

$$n_{0y} = \int_{y_k}^{y_n} \frac{2y}{y - y^*} \quad (4.9)$$

Даний інтеграл визначають методом графічного інтегрування (рис. 3.9).

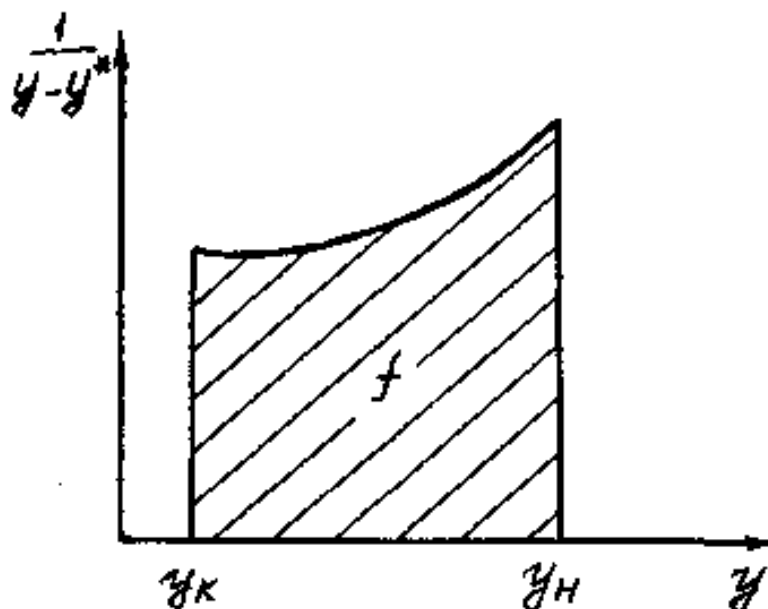


Рис.3.9 – Визначення числа одиниць переносу методом графічного інтегрування

Задаючись рядом значень y , проміжних між величинами y_n і y_k , будують криву залежності:

$$1/(y - y^*) \text{ від } y. \text{ (Тут } y_n = C_n; y_k = C_k; y^* = a_0).$$

Вимірюють площу, обмежену кривою, крайніми ординатами, що відповідають y_k і y_n , і віссю абсцис (площа заштрихована на рисунку). Після цього знаходять величину інтеграла з урахуванням масштабів M_1 і M_2 , що виражають число одиниць в 1 мм на осі ординат і осі абсцис графіка:

$$n_{0y} = \int_{y_k}^{y_n} \frac{Ly}{y - y^*} = fM_1M_2 \quad (4.10)$$

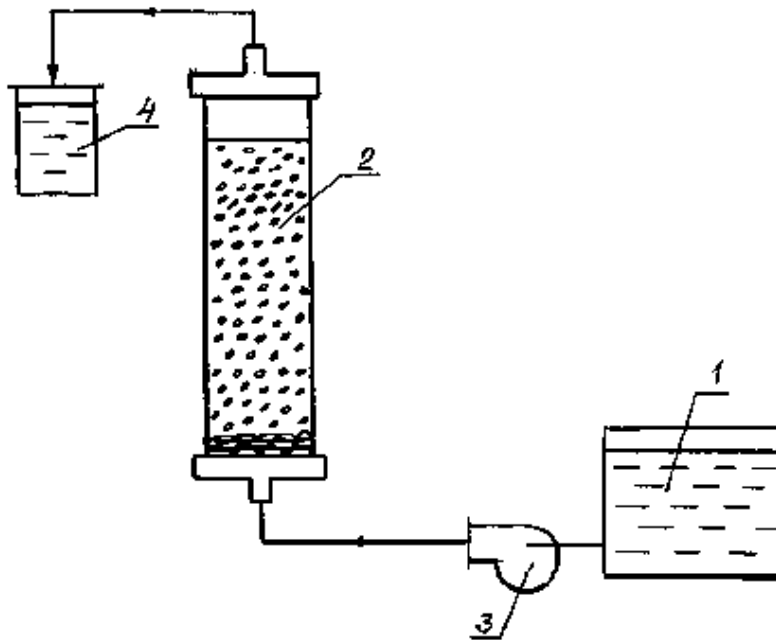


Рис. 3.10 – Схема лабораторної установки для адсорбції в динамічних умовах: 1 - ємкість із досліджуванним розчином; 2 – фільтр-колона із сорбентом; 3 - насос.

Необхідне устаткування:

1. Фільтр-колона.
2. Мірні циліндри на 200 мл.
3. Секундомір. Піпетки.
4. Скляні склянки.

5. Дистильована вода.
6. Фотоколориметр.
7. Аналітичні ваги.
8. Насос.

Порядок виконання роботи

1. Приготувати розчин барвника певної концентрації.
2. Визначити питому ємкість сорбенту і побудувати ізотерму сорбції.
3. Залити розчин у ємкість 1.
4. Пропустити розчин через фільтр-колону із сорбентом. У момент початку роботи починають відлік часу.
5. Послідовно відібрати проби фільтрату по 800 мл у 5 склянок. Паралельно вести замір часу.
6. У пробах фільтрату визначити оптичну щільність.
7. Розчин барвника пропускати через фільтр доти, поки концентрація барвника у фільтраті не наблизиться до концентрації вихідної речовини. Закінчити вимір часу.
8. За результатами експерименту побудувати « вихідну криву».

Протокол № 1

Таблиця 3.1

Барвник	Адсорбент	Висота шару адсорбенту	Концентрація барвника	Обсяг розчину	Час фільтрування	№ проби	Оптична щільність	Зміст барвника у фільтраті
		м	кг/м ³	м ³	с			кг/м ³

Середня швидкість фільтрування	Питома адсорбція	Коефіцієнт захисної дії	Час захисної дії шару	Час переміщення фронту адсорбції	Об'ємний коефіцієнт масопередачі	Кількість речовини, що поглинається в зоні масопередачі
м/год	кг/кг	1/с	T , год	τ_m , год	c^{-1}	кг

Обробка експериментальних даних.

1. Визначити об'ємну витрату розчину:

$$Q = \frac{W}{t},$$

де W – обсяг розчину минулого через фільтр; t – час фільтрування.

2. Визначити середню швидкість фільтрування:

$$V = \frac{Q}{F_\phi}.$$

3. Визначити час втрати захисної дії фільтра по вихідній кривій.
4. Визначити питому адсорбцію a_0 за ізотермою адсорбції.
5. Розрахувати коефіцієнт захисної дії шару K :

$$k = \frac{a_0}{V \cdot C_0},$$

6. Розрахувати час захисної дії сорбційного фільтра:

$$T = k \cdot H - \tau$$

7. Визначити з рівняння матеріального балансу швидкість переміщення фронту адсорбції (зони масопередачі) за рівнянням:

$$u = V \cdot \frac{C_0}{\varepsilon C_0 + a_0}.$$

8. Визначити об'ємний коефіцієнт масопередачі:

$$K_{gv} = \frac{u \cdot n_{oy}}{l_0}$$

9. Визначити кількість речовини M , поглиненої в зоні масопередачі

$$M = K_{gv} \cdot F_{\phi} l_0 \Delta Y_{cp} \tau_m,$$

$$\Delta Y_{cp} = \frac{0.9C_0}{n_{oy}},$$

Питання для самоконтролю:

1. Значення рівняння Шилова для розрахунку адсорбційних апаратів з нерухомим щільним шаром.
2. Що означають $\Delta\tau$, τ_m , τ_{np} , τ_0 . Як вони співвідносяться?
3. Що означає l_0 , для чого його необхідно визначати?
4. Як співвідносяться між собою коефіцієнт захисної дії шару K і швидкість сорбційного фронту u .
5. Зобразити графічну інтерпретацію рівняння Шилова.

Завданням на контрольну роботу є вирішення задач з двох розділів за варіантами, що наведені в таблиці

Номер и задач	Номери варіантів																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
<i>За 1 розділом</i>																									
1	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-
2	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-
3	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>За 2 розділом</i>																									
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
2	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+
3	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-
4	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-
5	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+
7	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
8	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-
9	+	-	-	-	-	+	-	-	+-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-

Рекомендована література

1. Айштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии Т.1 – М.: Высш. шк., 2002.- 887с.
2. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой) / П.Г. Романков, В. Ф. Фролов. - Л.: Химия, 1990. - 384 С.
3. Корольков Н.М. Массообменные процессы химической технологии. Жидкостная сорбция. Рига: Лиесма, 1970. – 247с.
4. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и пара.: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Высш. шк., 1969. – 416с.
5. Кельцев Н.А. Промышленная адсорбция газов и паров. – М.: Химия, 1976. – 511с.
6. Когановский А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. – К.: Наукова думка, 1983. – 240 с.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	3
Розділ 1.....	4
Розділ 2.....	9
Розділ 3.....	27
Лабораторна робота №1.....	27
Лабораторна робота № 2.....	39
Додаток	49
Рекомендована література.....	50

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки до практичних занять та виконання лабораторних робіт з дисципліни «Масопередача» (для студентів 3-4 курсів денної і заочної форм навчання освітньо – кваліфікаційного рівня бакалавр, напрямів підготовки 0926 “Водні ресурси”, 6.060103 “Гідротехніка (Водні ресурси)” спеціальності 6.092600 – “Водопостачання та водовідведення”).

Укладачі: В'ячеслав Олександрович Ткачов,
Ірина Миколаївна Чуб

Редактор: М. З. Аляб'єв

План 2009, поз. 158 М

Підп. до друку 05.05.2009	Формат 60x84 1/16	Папір офісний
Друк на ризографі.	Умов.- друк. арк. 2,2	Обл.-вид. арк. 2,5
Замовл. №	Тираж 100 прим.	

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ
61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12