

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання самостійної та контрольної робіт
з навчальної дисципліни

«НЕОРГАНІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ ДОВКІЛЛЯ»

*(для студентів 1–3 курсів денної та заочної форм навчання, першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей
101 – Екологія, 183 – Технології захисту навколишнього середовища)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021

Методичні рекомендації до виконання самостійної та контрольної робіт з навчальної дисципліни «Неорганічні забруднювачі довкілля» (для студентів 1–3 курсу денної та заочної форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 101 – Екологія, 183 – Технології захисту навколишнього середовища) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : І. С. Зайцева, Т. Д. Панайотова, О. О. Мураєва. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 59 с.

Укладачі: канд. хім. наук І. С. Зайцева,
канд. хім. наук Т. Д. Панайотова,
канд. хім. наук О. О. Мураєва

Рецензент

С. В. Нестеренко, кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою хімії, протокол № 3 від 24.10.2017

ЗМІСТ

Загальні зауваження.....	4
1 Розчини. Кількісний склад розчинів. Приготування і стандартизація розчинів.....	5
2 Гідроліз солей. Водневий показник.....	8
3 Метод нейтралізації.....	12
4 Метод комплексоутворення.....	16
5 Метод осадження. Добуток розчинності. Випадіння осадів.....	21
6 Дисперсні системи. Класифікація дисперсних систем. Способи одержання колоїдних систем. Будова міцел гідрозолів.....	26
7 Поверхневі явища. Поверхневий натяг. Поверхнево-активні речовини (ПАР). Адсорбція: молекулярна адсорбція, основні поняття та визначення; адсорбенти; ізотерма адсорбції. Адсорбція на твердих адсорбентах як метод очищення води від розчинених органічних домішок.....	30
8 Іонообмінна адсорбція. Іоніти, їх класифікація, способи отримання, основні фізико-хімічні показники. Обмінна ємність іонітів. Використання іонообмінного методу для пом'якшення і демінералізації води.....	40
9 Електрокінетичні властивості колоїдних систем. Будова подвійного електричного шару. Коагуляція, фактори, що її спричиняють. Теорія стійкості і коагуляції колоїдних систем. Умови коагуляції ліюфобних колоїдних систем.....	46
Список використаних джерел.....	53
Додатки.....	54

ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ

У процесі вивчення дисципліни «Неорганічні забруднювачі довкілля» важлива роль відводиться самостійній роботі студентів, яка є невід'ємною складовою частиною процесу підготовки фахівців, сприяє кращому засвоєнню і практичному застосуванню теоретичного матеріалу, є визнаним і дієвим засобом набуття і розвитку творчого мислення і самовдосконалення студентів. Цілком очевидно, що успішне засвоєння дисципліни ефективно лише при умові систематичної і активної участі у процесі навчання самих студентів.

Одним зі шляхів активізації вивчення дисципліни є збільшення часу, що витрачає студент на самостійну роботу, а ефект самостійної роботи буде тим вищим, чим краще вона організована. Мета цих методичних вказівок – допомогти студентам у правильній і раціональній організації самостійної роботи під керівництвом і контролем викладачів.

Виконання контрольної роботи є однією із складових самостійної роботи студента під час вивчення предмета. Безпосередньому виконанню роботи передують вивчення теоретичного матеріалу одночасно з детальним розглядом прикладів розв'язання типових для кожного розділу завдань. Такі приклади наведені на початку відповідного розділу цих вказівок. На цьому етапі і під час виконання завдання можна використовувати навчальні посібники з наведеного в кінці вказівок списку літератури. Не слід переходити до вивчення нових розділів курсу, доки детально не вивчений попередній.

Методичні вказівки включають дев'ять розділів, і два додатки, необхідні для розв'язання задач.

Кожен студент виконує індивідуальний варіант самостійної (контрольної, розрахунково-графічної) роботи, номер якого визначає викладач.

Номери й умови завдань *необхідно переписувати* в тій послідовності, в якій вони вказані у варіанті контрольної роботи. Відповіді на теоретичні питання і розв'язання задач слід надаватися з докладними поясненнями.

Контрольна робота повинна бути акуратно оформлена в окремому зошиті, датована, підписана студентом, своєчасно подана на рецензування і зарахована до початку екзаменаційної сесії. Для зауважень і позначень рецензента слід залишати широкі поля (3 см). Якщо контрольна робота містить істотні помилки, їх необхідно усунути відповідно до зауважень рецензента. виправлення необхідно виконати в кінці роботи, а не в рецензованому тексті.

Контрольну роботу, яка виконана не за своїм варіантом, викладач не рецензує й не зараховує.

1 РОЗЧИНИ. КІЛЬКІСНИЙ СКЛАД РОЗЧИНІВ. ПРИГОТУВАННЯ І СТАНДАРТИЗАЦІЯ РОЗЧИНІВ

Приклад 1. Для нейтралізації 40 мл розчину сульфатної кислоти знадобилося 24 мл 0,2 н розчину лугу. Визначить молярну концентрацію еквівалента сульфатної кислоти у розчині.

Розв'язання. Речовини взаємодіють одна з одною в еквівалентних кількостях: $n_{\text{екв}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = n_{\text{екв}}(\text{NaOH})$.

$$n_{\text{екв}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = c\left(\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4\right) \cdot V(\text{H}_2\text{SO}_4), \quad n_{\text{екв}}(\text{NaOH}) = c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH}),$$

$$c\left(\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4\right) \cdot V(\text{H}_2\text{SO}_4) = c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH}).$$

$$c\left(\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4\right) = \frac{c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})}{V(\text{H}_2\text{SO}_4)} = \frac{0,2 \cdot 24}{40} = 0,12 \text{ моль/л.}$$

Приклад 2. Опишіть приготування 200 мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти з 5 % розчину, густина якого 1,02 г/см³.

Розв'язання. Спочатку розрахуємо масу речовини HCl, необхідну для приготування 200 мл 0,1 н розчину HCl:

$$c(\text{HCl}) = \frac{m(\text{HCl})}{M(\text{HCl}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl})};$$

$$m(\text{HCl}) = c(\text{HCl}) \cdot M(\text{HCl}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}) = 0,1 \cdot 36,5 \cdot 1 \cdot 0,2 = 0,73 \text{ г.}$$

Потім розрахуємо, масу 5 % розчину, що містить 0,73 г речовини HCl:

$$100 \text{ г розчину} - 5 \text{ г HCl}$$

$$x \text{ г розчину} - 0,73 \text{ г HCl}$$

$$x = m_{\text{р-ну}} = \frac{100 \cdot 0,73}{5} = 14,6 \text{ г.}$$

Таким чином, для приготування 200 мл 0,1 н розчину HCl треба взяти 14,6 г 5 % розчину HCl

Нарешті розрахуємо об'єм 5 % розчину, який потрібний для приготування 200 мл 0,1 н розчину:

$$V_{\text{р-ну}} = \frac{m_{\text{р-ну}}}{\rho_{\text{р-ну}}} = \frac{14,6}{1,02} = 14,3 \text{ мл.}$$

Для приготування 200 мл 0,1 н розчину HCl з 5 %-вого розчину необхідно за допомогою бюретки (або циліндра) набрати 14,3 мл 5 %-вого розчину HCl, перенести цей об'єм у мірну колбу на 200 мл і довести загальний об'єм розчину до 200 мл дистильованою водою.

Приклад 3. Розрахуйте рН 0,001 М розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за умов повної дисоціації кальцій гідроксиду.



У відповідності з рівнянням дисоціації $[\text{OH}^-] = 2[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ тому $[\text{OH}^-] = 2 \cdot 0,001 = 0,002 \text{ моль/л.}$

$$[\text{H}^+] = \frac{K_w}{[\text{OH}^-]} = \frac{10^{-14}}{0,002} = 0,5 \cdot 10^{-11} \text{ моль/л.}$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg(0,5 \cdot 10^{-11}) = 11,30.$$

Контрольні задачі

1. Опишіть приготування 200 мл 0,01 н розчину H_3PO_4 із 2 % розчину кислоти ($\rho = 1,02 \text{ г/см}^3$). Визначіть pH цього розчину, якщо $K_{\text{д1}} = 7 \cdot 10^{-3}$.
2. Опишіть приготування 200 мл 0,01 н розчину H_2SO_4 із 5 % розчину кислоти ($\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$). Визначіть pH цього розчину.
3. До 200 мл 10 % розчину сульфатної кислоти ($\rho = 1,045 \text{ г/см}^3$) додали 100 мл 5 %-вого розчину ($\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$). Визначіть процентну, молярну, нормальну концентрації одержаного розчину, а також його pH.
4. Опишіть приготування 0,2 л 0,01 н розчину KOH з 5 % розчину ($\rho = 1,033 \text{ г/см}^3$). Визначіть pH цього розчину.
5. До 300 мл 2 % розчину нітратної кислоти ($\rho = 1,01 \text{ г/см}^3$) додали 250 мл 5 % розчину ($\rho = 1,03 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте процентну, молярну, нормальну концентрації одержаного розчину, а також його pH.
6. Визначіть молярну та нормальну концентрації H_3PO_4 в 5 % розчині ($\rho = 1,09 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте pH цього розчину, якщо $K_{\text{д1}} = 7,1 \cdot 10^{-3}$.
7. Опишіть приготування 0,1 н розчину NaOH з 5 % розчину ($\rho = 1,06 \text{ г/см}^3$). Визначіть pH цього розчину. За допомогою яких розчинів стандартизують розчин NaOH.
8. Опишіть приготування 200 мл 0,01 н розчину хлоридної кислоти з 0,1 н. Розрахуйте pH цього розчину. За допомогою яких речовин стандартизують розчин HCl?
9. Опишіть приготування 500 мл 0,01 н розчину NaOH з 0,1 н. Розрахуйте pH цього розчину. За допомогою яких речовин стандартизують розчин NaOH?
10. Визначіть молярну та нормальну концентрації HNO_3 в 2 % розчині ($\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте pH цього розчину. Якого кольору буде метилоранж у цьому розчині?
11. Який об'єм 10 % розчину натрій карбонату (густина $1,105 \text{ г/см}^3$) потрібний для приготування 5 л 2 % розчину (густина $1,02 \text{ г/см}^3$)?
12. До 1 л 2 % розчину калій гідроксиду ($\rho = 1,01 \text{ г/см}^3$) додали 2 л води. Розрахуйте процентну, молярну, нормальну концентрації калій гідроксиду в одержаному розчині, а також його pH.
13. У 2 л водного розчину міститься 0,8765 г сульфатної кислоти. Густина розчину $1,04 \text{ г/см}^3$. Розрахуйте процентну, молярну, нормальну концентрації сульфатної кислоти в цьому розчині, а також його pH.
14. Опишіть приготування 0,5 % розчину кальцій гідроксиду ($\rho = 1,06 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте молярну і нормальну концентрації кальцій гідроксиду в одержаному розчині, а також його pH.
15. Опишіть приготування 100 мл розчину хлоридної кислоти з 0,1 М HCl розбавленням останнього у співвідношенні 1:4. Яка молярна концентрація хлоридної кислоти в розчині, що утворився?

16. Опишіть приготування 300 мл 0,1 н розчину оцтової (етанової) кислоти з 5 % розчину ($\rho = 1,01 \text{ г/см}^3$) Розрахуйте рН розчину, якщо константа дисоціації оцтової кислоти дорівнює $1,8 \cdot 10^{-5}$.

17. Титр сульфатної кислоти в розчині $0,0063 \text{ г/см}^3$. Розрахуйте для цього розчину рН, молярну і нормальну концентрації кислоти.

18. Яку наважку бури ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) потрібно взяти для приготування $0,5 \text{ дм}^3$ 0,1 н розчину. Для чого використовують розчин бури?

19. Скільки 2 М розчину HCl потрібно додати до 1 дм^3 0,15 М розчину HCl , щоб отримати 0,2 М розчин? Розрахуйте рН отриманого розчину.

20. Розчин оцтової (етанової) кислоти (25 см^3) нейтралізували $20,00 \text{ см}^3$ 0,15 н розчином KOH . Розрахуйте молярну концентрацію оцтової кислоти у вихідному розчині, а також його рН.

21. Опишіть приготування 2 дм^3 0,01 н розчину хлоридної кислоти з 36 %-вого розчину кислоти ($\rho = 1,179 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте рН цього розчину.

22. Із 5,3 г Na_2CO_3 приготували 1 дм^3 розчину ($\rho = 1,11 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте молярну і нормальну концентрації натрій карбонату в розчині.

23. До 500 мл 10 % розчину хлоридної кислоти ($\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$) прилили 1 л води. Визначить процентну, молярну, нормальну концентрації хлоридної кислоти в одержаному розчині, а також його рН.

24. Титр натрій гідроксиду в розчині $0,0045 \text{ г/см}^3$. Розрахуйте для цього розчину рН, молярну і нормальну концентрації натрій гідроксиду.

25. Опишіть приготування 250 мл 0,1 н розчину мурашиної (метанової) кислоти з 5 % розчину ($\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$). Розрахуйте рН одержаного розчину, якщо константа дисоціації мурашиної кислоти дорівнює $1,8 \cdot 10^{-4}$.

26. Який об'єм розчину сульфатної кислоти з масовою часткою 0,98 і густиною $1,84 \text{ г/см}^3$ потрібен для приготування 2 л 0,1 н розчину H_2SO_4 ?

27. Який об'єм 10 % розчину натрій карбонату ($\rho = 1,105 \text{ г/см}^3$) потрібно взяти для приготування 1 л розчину з нормальною концентрацією 0,05 н?

28. У природних водах залізо знаходиться переважно у вигляді $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_3$. Для видалення заліза використовують вапнування (обробка води кальцій гідроксидом). Скільки грамів заліза міститься в 1 л води, якщо на його осадження у вигляді $\text{Fe}(\text{OH})_3$ із 200 мл води знадобилось 4 мл 0,01 н розчину $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

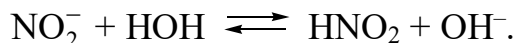
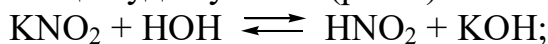
29. Розрахуйте молярну, нормальну концентрації амоній гідроксиду в 3 % розчині ($\rho = 1,109 \text{ г/см}^3$), а також його рН, якщо константа дисоціації амоній гідроксиду дорівнює $1,75 \cdot 10^{-5}$.

30. До 500 мл 10 % розчину нітратної кислоти ($\rho = 1,105 \text{ г/см}^3$) прилили 1,5 л води. Визначити процентну, молярну, нормальну концентрації та рН отриманого розчину.

2 ГІДРОЛІЗ СОЛЕЙ. ВОДНЕВИЙ ПОКАЗНИК

Приклад 1. До 30 см^3 води долили 5 см^3 3 М розчину калій нітриту. Обчисліть ступінь гідролізу солі за 25°C і pH розчину.

Розв'язання. Запишемо рівняння гідролізу солі KNO_2 . Сіль утворена сильною основою і слабкою кислотою, отже, гідроліз буде відбуватися за аніоном, реакція середовища буде лужною ($\text{pH} > 7$):



Розрахуємо концентрацію солі $c_2(\text{KNO}_2)$ після розбавлення розчину. Об'єм розчину калій нітриту до змішування з водою був $V_1 = 5 \text{ см}^3$, а після змішування став $V_2 = 5 + 30 = 35 \text{ см}^3$. Тоді

$$c_1(\text{KNO}_2) \cdot V_1 = c_2(\text{KNO}_2) \cdot V_2$$

$$c_2(\text{KNO}_2) = \frac{c_1(\text{KNO}_2) \cdot V_1}{V_2} = \frac{3 \cdot 5}{35} = 0,429 \text{ моль/л.}$$

Визначимо значення константи гідролізу за рівнянням

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\text{W}}}{K_{\text{д}}(\text{HNO}_2)} = \frac{10^{-14}}{6,9 \cdot 10^{-4}} = 1,45 \cdot 10^{-11},$$

де K_{Γ} – константа гідролізу солі KNO_2 ,

K_{W} – іонний добуток води ($K_{\text{W}} = 1 \cdot 10^{-14}$),

$K_{\text{д}}(\text{KNO}_2)$ – константа дисоціації нітритної кислоти ($K_{\text{д}}(\text{KNO}_2) = 6,9 \cdot 10^{-4}$ – додаток А, табл. А.2).

Розрахуємо ступінь гідролізу солі h :

$$h = \sqrt{\frac{K_{\Gamma}}{c_2(\text{KNO}_2)}} = \sqrt{\frac{1,45 \cdot 10^{-11}}{0,429}} = 5,8 \cdot 10^{-6}.$$

Розрахуємо pH водного розчину калій нітриту. У відповідності з рівнянням гідролізу, якщо вихідна концентрація аніонів NO_2^- дорівнює c_2 моль/л, а гідролізується тільки частина h цих аніонів, то концентрація аніонів OH^- становитиме:

	NO_2^-	+	HOH	\rightleftharpoons	HNO_2	+	OH^-
початк. конц.	$c_2(\text{KNO}_2)$				0		0
зміна конц.	$-hc_2(\text{KNO}_2)$				$hc_2(\text{KNO}_2)$		$hc_2(\text{KNO}_2)$
рівн. конц.	$c_2(\text{KNO}_2) - hc_2(\text{KNO}_2)$				$hc_2(\text{KNO}_2)$		$hc_2(\text{KNO}_2)$

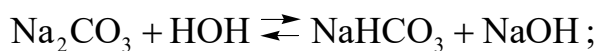
$$[\text{OH}^-] = hc_2(\text{KNO}_2) = 5,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,429 = 2,49 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л,}$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-14} / 2,49 \cdot 10^{-6} = 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ моль/л,}$$

$$\text{pH} = -\lg 4,0 \cdot 10^{-9} = -(\lg 4,0 + \lg 10^{-9}) = 9 - \lg 4,0 = 8,4.$$

Приклад 2. Розрахуйте значення рН 0,1 М розчину Na_2CO_3 .

Розв'язання. Сіль утворена сильною основою і слабкою кислотою – гідроліз буде відбуватися за аніоном, реакція середовища буде лужною ($\text{pH} > 7$):



Визначимо значення константи гідролізу за рівнянням

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\text{W}}}{K_{\text{ДП}}(\text{H}_2\text{CO}_3)} = \frac{10^{-14}}{4,69 \cdot 10^{-11}} = 2,13 \cdot 10^{-4}.$$

Визначимо ступінь гідролізу:

$$h = \sqrt{\frac{K_{\Gamma}}{c(\text{Na}_2\text{CO}_3)}} = \sqrt{\frac{2,13 \cdot 10^{-4}}{0,1}} = \sqrt{2,13 \cdot 10^{-3}} = 4,6 \cdot 10^{-2}.$$

$$[\text{OH}^-] = h \cdot c = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}, [\text{H}^+] = 10^{-14} / 4,6 \cdot 10^{-3} = 2,17 \cdot 10^{-12}; \text{pH} = 11,7.$$

Буферний розчин – водний розчин, що містить сполуки, які протистоять значній зміні рН при додаванні невеликої кількості кислоти або основи, або при розведенні.

Буферні розчини використовують для підтримання сталого рН середовища. Вони також входять до складу великої кількості промислових товарів, таких як деякі медичні препарати, засоби для догляду за шкірою і волоссям тощо. Буферні розчини необхідні для забезпечення гомеостазу живих організмів, наприклад, рН крові людини підтримується на сталому рівні, оптимальному для транспорту кисню (близько 7,4), завдяки кільком буферним системам

Зазвичай буферні розчини містять слабку кислоту та сіль, яка містить аніон цієї кислоти (наприклад, $\text{CH}_3\text{COOH} / \text{CH}_3\text{COONa}$), або слабку основу та сіль, яка містить катіон цієї основи (наприклад, $\text{NH}_4\text{OH} / \text{NH}_4\text{Cl}$).

Буферні розчини одержують при частковій нейтралізації слабкої кислоти сильною основою, або слабкої основи сильною кислотою.

Водневий показник рН буферного розчину, який містить слабку кислоту НА та сіль, яка містить аніон цієї кислоти A^- , можна розрахувати за рівнянням Гендерсона-Хасельбальха:

$$[\text{H}^+] = K_{\text{Д}}(\text{НА}) \cdot \frac{[\text{НА}]}{[\text{A}^-]} \approx K_{\text{Д}}(\text{НА}) \cdot \frac{c(\text{кислоти})}{c(\text{солі})},$$

де $K_{\text{Д}}(\text{НА})$ – константа дисоціації слабкої кислоти НА;

$[\text{НА}]$, $[\text{A}^-]$ – рівноважні концентрації слабкої кислоти та аніона цієї кислоти;

$c(\text{кислоти})$, $c(\text{солі})$ – вихідні концентрації кислоти і солі.

$$\text{pH} = \text{p}K_{\text{д}}(\text{HA}) + \lg \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} \approx \text{p}K_{\text{д}}(\text{HA}) + \lg \frac{c(\text{солі})}{c(\text{кислоти})},$$

де $\text{p}K_{\text{д}}(\text{HA}) = -\lg K_{\text{д}}(\text{HA})$.

pH буферного розчину, який містить слабку основу ВОН та сіль, яка містить катіон цієї основи В^+ , можна розрахувати:

$$[\text{ОН}^-] = K_{\text{д}}(\text{ВОН}) \cdot \frac{[\text{ВОН}]}{[\text{В}^+]} \approx K_{\text{д}}(\text{ВОН}) \cdot \frac{c(\text{основи})}{c(\text{солі})},$$

де $K_{\text{д}}(\text{ВОН})$ – константа дисоціації слабкої основи ВОН;

$[\text{ВОН}]$, $[\text{В}^+]$ – рівноважні концентрації слабкої основи та катіона цієї основи;
 $c(\text{основи})$, $c(\text{солі})$ – вихідні концентрації основи і солі.

$$\text{pOH} \approx \text{p}K_{\text{д}}(\text{ВОН}) + \lg \frac{c(\text{солі})}{c(\text{основи})}, \quad \text{pH} = 14 - \text{pOH},$$

де $\text{p}K_{\text{д}}(\text{ВОН}) = -\lg K_{\text{д}}(\text{ВОН})$.

Приклад 3. Розрахуйте pH буферного розчину, який містить 0,100 моль/л оцтової (етанової) кислоти й 0,100 моль/л ацетату натрію.
 $K_{\text{д}}(\text{CH}_3\text{COOH}) = 1,74 \cdot 10^{-5}$.

Розв'язання. Розрахуємо pH кислотного буферного розчину за формулою

$$\text{pH} = \text{p}K_{\text{д}}(\text{CH}_3\text{COOH}) + \lg \frac{c(\text{CH}_3\text{COONa})}{c(\text{CH}_3\text{COOH})}$$

$c(\text{CH}_3\text{COOH}) = c(\text{CH}_3\text{COONa}) = 0,100$ моль/л, тоді:

$$\text{pH} = \text{p}K(\text{CH}_3\text{COOH}) = -\lg 1,74 \cdot 10^{-5} = 4,76.$$

Приклад 4. Розрахуйте pH буферного розчину, який містить 0,100 моль/л аміаку (NH_4OH) й 0,200 моль/л хлориду амоній хлориду.
 $K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH}) = 1,76 \cdot 10^{-5}$.

Розв'язання. Розрахуємо pOH за формулою:

$$\text{pOH} = \text{p}K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH}) + \lg \frac{c(\text{NH}_4\text{Cl})}{c(\text{NH}_4\text{OH})}$$

$$\text{p}K_{\text{д}}(\text{NH}_4\text{OH}) = -\lg 1,76 \cdot 10^{-5} = 4,75.$$

$$\text{pOH} = 4,75 + \lg \frac{0,200}{0,100} = 5,05; \text{pH} = 14 - 5,05 = 8,95.$$

Контрольні задачі

Значення констант дисоціації $K_{\text{д}}$ слабких електролітів наведені в додатку А, табл. А.2.

1. У 500 мл розчину міститься 2,52 г Na_2CO_3 . Визначить pH розчину і ступінь гідролізу солі (розглядати гідроліз за першим ступенем).

2. Розрахуйте pH і ступінь гідролізу в 0,05 М розчині $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$. Чому буде дорівнювати pH, якщо розчин розбавити водою в 5 разів?

3. До 100 мл 0,2 М оцтової (етанової) кислоти додали 100 мл 0,2 М калій гідроксиду. Розрахуйте pH і ступінь гідролізу солі.

4. Чому розчин NaHCO_3 має слабко-лужну, а розчин NaHSO_3 – слабко-кислу реакцію? Відповідь ілюструйте рівняннями реакції гідролізу й дисоціації солей. Наведіть розрахунки pH в 0,01 М розчинах відповідних солей.

5. Розрахуйте об'єм розчину з молярною концентрацією натрій гідроксиду 0,200 моль/л, який необхідно додати до 100,0 см³ розчину з молярною концентрацією оцтової (етанової) кислоти 0,150 моль/л, щоб одержати буферний розчин рН якого дорівнює 5,00.

6. Як зміниться ступінь гідролізу і рН розчину Na₂CO₃ при його розбавленні від 0,1 М до 0,001 М? Наведіть рівняння гідролізу солі. Розрахунки представити для гідролізу за першим ступенем.

7. Скільки грамів KCN знаходиться в 10 мл розчину, якщо його рН дорівнює 11,0?

8. Змішали 40 мл 0,3 М оцтової (етанової) кислоти і 20 мл 0,15 М калій гідроксиду. Розрахуйте рН розчину.

9. Розрахуйте рН розчину, якщо ступінь гідролізу в 0,05 М розчині Na₃PO₄ дорівнює 5 %.

10. Розрахуйте рН розчину, якщо ступінь гідролізу в 0,1 М розчині KNO₂ дорівнює 3 %.

11. Розрахуйте рН розчину і ступінь гідролізу солі NH₄Cl, якщо концентрація її дорівнює 0,2 моль/л.

12. За якої молярної концентрації NH₄NO₃ розчин має рН 5?

13. Скільки грамів NH₄Cl міститься в 1 л розчині, якщо його рН 6?

14. Розрахуйте рН буферного розчину, 1,00 л якого містить 0,100 моль натрій гідрокарбонату і 0,0100 моль натрій карбонату.

15. Розрахуйте другу константу дисоціації карбонатної кислоти, якщо 0,1 М розчин Na₂CO₃ має рН 12.

16. Який колір матиме 0,1 М розчин натрій карбонату, якщо до нього додати фенолфталеїн? Відповідь підтвердить розрахунком.

17. В 1 л розчину міститься 0,1 моль NH₄Cl і 1·10⁻⁴ моль HCl. Визначить ступінь гідролізу солі в цьому розчині й у розчині, що не містить HCl.

18. Який колір матиме 0,2 М розчин NaH₂PO₄, якщо до нього додати метиловий жовтогарячий? Відповідь підтвердить розрахунками.

19. Скільки твердого натрій цианіду (г) необхідно розчинити в 50 мл 0,02 М розчину цианідної кислоти, щоб рН розчину дорівнював 8,2?

20. Який розчин матиме більш лужне середовище: 0,01 М розчин Na₂CO₃ чи 0,1 М розчин Na₂SiO₃? Відповідь підтвердить розрахунками.

21. На скільки зміниться рН форміатного буферного розчину, який містить мурашину (метанову) кислоту і натрій форміат концентрацією розчиненої речовини 0,100 моль/л, якщо до 20,0 мл такого розчину додати 5,00 мл розчину з концентрацією хлоридної кислоти 0,0100 моль/л?

22. Який розчин матиме більш низьке значення рН: 0,1 М розчин Na₃PO₄ чи 0,1 М розчин CH₃COONa? Відповідь підтвердить розрахунками.

23. Скільки міліграмів натрій ацетату необхідно додати до 3,00 мл розчину оцтової (етанової) кислоти концентрацією 0,100 моль/л, щоб одержати розчин з молярною концентрацією [H⁺] = 4,50·10⁻⁵ моль/л?

24. Скільки грамів CH₃COONa потрібно додати до 500 мл води, щоб одержати розчин з рН 9?

25. Розрахуйте рН карбонатного буферного розчину, для приготування 500 мл якого зважили 21,1980 г Na_2CO_3 й 25,2030 г NaHCO_3 .

26. У 250 мл розчину міститься 0,535 г NH_4Cl . Розрахуйте рН і ступінь гідролізу солі.

27. Яку наважку амоній нітрату потрібно розчинити в 150 cm^3 розчину, щоб рН дорівнювало 5?

28. Розчин NaH_2PO_4 має слабо-кислу, а розчин Na_3PO_4 – сильно-лужну реакцію. Поясніть цей факт за допомогою відповідних йонно-молекулярних рівнянь і розрахунку рН розчинів відповідних солей для концентрації 0,001 моль/л.

29. В якому об'ємі потрібно розчинити наважку натрій ацетату 0,03 г, щоб одержати розчин з рН = 8?

30. Розрахуйте рН буферного розчину, для приготування якого змішали 20 мл 0,05 М розчину нітритної кислоти з 40 мл 2,0 М розчину калій нітриту.

3 МЕТОД НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ

Приклад 1. На титрування 20 cm^3 0,02 н розчину HCl витрачено 15 cm^3 розчину NaOH . Визначить нормальну концентрацію NaOH .

Розв'язання. Так як речовини реагують між собою в еквівалентних кількостях, то кількість еквівалентів HCl у точці еквівалентності повинна дорівнювати кількості еквівалентів NaOH :

$$\begin{aligned} n_{\text{екв}}(\text{HCl}) &= n_{\text{екв}}(\text{NaOH}); \\ n_{\text{екв}}(\text{HCl}) &= c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}); \quad n_{\text{екв}}(\text{NaOH}) = c_{\text{н}}(\text{NaOH}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{NaOH}) \\ c_{\text{н}}(\text{NaOH}) &= \frac{c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl})}{V_{\text{р-ну}}(\text{NaOH})} = \frac{0,02 \cdot 20}{15} = 0,027 \text{ моль/л.} \end{aligned}$$

Приклад 2. Водневий показник води дорівнює 10. Які показники якості води можна визначити методом нейтралізації?

Розв'язання. При рН=10 можна визначити:

1. **Лужність вільну** ($L_{\text{в}}$) (рН від 14 до 9) – титрування проби води 0,1 н розчином HCl у присутності фенолфталеїну.

2. **Лужність загальну** ($L_{\text{заг}}$) (рН від 14 до 4) – титрування проби води 0,1 н розчином HCl у присутності метилоранжу.

Лужність розраховують за формулою:

$$L_{\text{заг}} = \frac{c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}) \cdot 1000}{V(\text{H}_2\text{O})}, \text{ ммоль/л.}$$

3. Форми карбонатної кислоти: CO_3^{2-} і HCO_3^- .

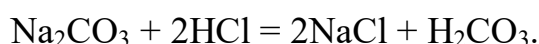
Вміст CO_3^{2-} дорівнює лужності вільній (ммоль/л). Для визначення CO_3^{2-} в мг/л необхідно $L_B \cdot M(1/2 \text{CO}_3^{2-}) = L_B \cdot 60$.

Вміст HCO_3^- дорівнює різниці ($L_{\text{заг}} - L_B$) у ммоль/л. У мг/л вміст HCO_3^- розраховують як $(L_{\text{заг}} - L_B) \cdot M(\text{HCO}_3^-) = (L_{\text{заг}} - L_B) \cdot 61$.

4. Твердість карбонатну (T_K), яка дорівнює різниці ($L_{\text{заг}} - L_B$) в ммоль/л.

Приклад 3. Розрахуйте масу Na_2CO_3 , якщо на титрування солі з утворенням H_2CO_3 , витрачено 22,35 мл 0,2113 М розчину HCl .

Розв'язання.



У точці еквівалентності:

$$\begin{aligned} n_{\text{екв}}(\text{HCl}) &= n_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3); \\ n_{\text{екв}}(\text{HCl}) &= c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}); \\ n_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) &= \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3)}; \\ \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3)} &= c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}). \end{aligned}$$

$$f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 1/2, \quad m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = c_{\text{н}}(\text{HCl}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{HCl}) \cdot M(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 0,2113 \cdot 22,35 \cdot 10^{-3} \cdot 106 \cdot 1/2 = 0,2503 \text{ г}.$$

Контрольні задачі

1. Розчин містить 1,4320 г калій гідроксиду в 0,5 л. Скільки мілілітрів цього розчину піде на титрування 20 мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти? Який індикатор потрібно вибрати для титрування?

2. Наважку натрій карбонату вагою 1,3540 г розчинили в мірній колбі на 250 мл, об'єм розчину довели до позначки дистильованою водою. На титрування 20 мл цього розчину витрачено 18,8 мл розчину хлоридної кислоти. Розрахуйте концентрацію хлоридної кислоти в розчині? Який індикатор для цього титрування було використано?

3. На титрування розчину, що досліджують, витрачено 18,5 мл 0,1 н розчину натрій гідроксиду. Розрахуйте масу речовини NaOH .

4. Скільки мілілітрів 20 % розчину хлоридної кислоти з густиною $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ знадобиться для приготування 250 мл 0,1 н розчину? Який стандартний розчин і який індикатор потрібні для визначення точної концентрації HCl в розчині? Наведіть рівняння реакції.

5. Розрахуйте нормальну концентрацію NH_4OH в розчині, якщо рН розчину 11.

6. Які показники якості води можна визначити, якщо на титрування 100 мл води з фенолфталеїном витрачено 5 мл 0,1 н розчину HCl , а на

титрування 100 мл води в присутності метилоранжу – 8 мл 0,1 н розчину HCl. Відповідь доведіть розрахунками.

7. Розрахуйте рН розчину, отриманого при змішуванні 20 мл 0,2 н розчину HCl і 18 мл 0,2 н розчину NaOH. Яке забарвлення матиме цей розчин, якщо до нього додати фенолфталеїн.

8. Розрахуйте наважку щавлевої (етандіової) кислоти $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, необхідну для приготування 200 мл 0,1 н розчину. Розрахуйте нормальну концентрацію NaOH в розчині, якщо на титрування 10 мл 0,1 н розчину щавлевої кислоти витрачено 10,8 мл розчину NaOH. Який індикатор слід використовувати при титруванні?

9. Як приготувати 500 мл 0,1 н розчину натрій карбонату? Якої концентрації була хлоридна кислота, якщо на титрування 10 мл розчину натрій карбонату витрачено 9,8 мл розчину хлоридної кислоти?

10. Скільки грамів натрій гідроксиду знадобиться для приготування 2 літрів 0,2 н розчину? Як визначити точну концентрацію цього розчину? Скільки мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти піде на повну нейтралізацію NaOH?

11. Розрахуйте наважку Na_2CO_3 , необхідну для приготування 250 мл 0,1 н розчину. Яка молярна концентрація Na_2CO_3 в цьому розчині? Скільки мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти знадобиться на повну нейтралізацію Na_2CO_3 ?

12. Як приготувати 2 л 0,1 н розчину хлоридної кислоти, використовуючи 38 % її розчин, густина якого 1,18 г/мл? Розрахуйте нормальну концентрацію NaOH в розчині, якщо на титрування 10 мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти витрачено 11,4 мл розчину NaOH. Який індикатор слід використовувати при титруванні?

13. Визначіть, які показники якості води можна розрахувати за даними метода нейтралізації, якщо рН води дорівнює 4,8.

14. Яку лужність води і форми карбонатної кислоти можна розрахувати, якщо на титрування 100 мл води з індикатором метилоранжем витрачено 6,5 мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти?

15. Обчисліть карбонатну твердість води, якщо для реакції з кальцій гідрогенкарбонатом, що міститься в 200 см^3 води, потрібно 13 см^3 0,1 н розчину HCl.

16. Чому дорівнює карбонатна твердість води, якщо на титрування 100 мл її з метилоранжем було витрачено 6,2 мл 0,1 н розчину хлоридної кислоти? Скільки міліграмів гідрогенкарбонат-іонів міститься в пробі води?

17. У досліджуваній воді індикатор метилоранж забарвився в червоний колір. На титрування 100 мл цієї води в присутності метилоранжу витрачено 4,2 мл 0,1 н розчину натрій гідроксиду. Розрахуйте за цими даними показники якості води.

18. На титрування 100 мл природної води з індикатором фенолфталеїном до появи рожевого забарвлення витрачено 4 мл 0,1 н розчину NaOH. Скільки вільної карбонатної кислоти (мг/л) міститься в досліджуваній воді?

19. Наважку натрій карбонату вагою 0,5300 г розчинили в мірній колбі на 500 мл. На титрування 25 мл цього розчину було витрачено 24,5 мл розчину

хлоридної кислоти в присутності метилоранжу. Розрахуйте нормальні концентрації натрій карбонату і хлоридної кислоти у вихідних розчинах.

20. Розчин оцтової (етанової) кислоти (25 см^3) нейтралізували 20 см^3 $0,15\text{ М}$ розчину NaOH . Розрахуйте молярну концентрацію і масу оцтової кислоти у вихідному розчині.

21. При визначенні карбонатів і гідрогенкарбонатів на титрування 100 мл досліджуваної води з індикатором фенолфталеїном витрачено $2,8\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину HCl , а з індикатором метилоранжем – $3,2\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину HCl . Скільки міліграмів карбонат і гідрогенкарбонат-іонів міститься в 1 л досліджуваної води?

22. Твердість води, що містить тільки кальцій гідрогенкарбонат, дорівнює 5 ммоль/л . Який об'єм $0,1\text{ н}$ розчину HCl потрібен для реакції з кальцій гідрогенкарбонатом, який міститься в 50 см^3 цієї води?

23. На титрування 100 мл досліджуваної природної води з індикатором фенолфталеїном до появи рожевого забарвлення витрачено $2,6\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину NaOH , а при титруванні 100 мл цієї ж води з індикатором метилоранжем до переходу жовтого забарвлення в жовтогаряче витрачено $2,6\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину HCl . Які показники якості води можна розрахувати за результатами титрування?

24. Визначить, масову частку сульфатної кислоти у зразку, якщо його наважка $1,5678\text{ г}$ була розчинена в мірній колбі на 200 мл . На нейтралізацію 20 мл цього розчину було витрачено $17,6\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину NaOH .

25. Розрахуйте концентрацію гідрогенкарбонат-іонів у воді, якщо pH води 10 , концентрація карбонат-іонів дорівнює 4 ммоль/л , а константа дисоціації карбонатної кислоти за другим ступенем $K_{\text{дн}} = 5,6 \cdot 10^{-11}$.

26. На титрування 100 мл досліджуваної природної води з індикатором фенолфталеїном до знебарвлення витрачено $2,6\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину HCl , потім до відтитрованої проби води додали індикатор метилоранж, продовжили титрувати й витратили $3,6\text{ мл}$ $0,1\text{ н}$ розчину HCl до переходу жовтого забарвлення в жовтогаряче. Які показники якості води можна розрахувати за результатами титрування?

27. Розрахуйте масову частку Na_2CO_3 у технічній соді, якщо наважка технічної соди дорівнює $0,2005\text{ г}$, а на її титрування витрачено 20 см^3 $0,1\text{ н}$ розчину хлоридної кислоти.

28. Наважку технічної нітратної кислоти масою $1,0100\text{ г}$ перевели в розчин, який містить 25 см^3 $0,5\text{ М}$ розчину NaOH . Надлишок NaOH відтитрували $10,5\text{ см}^3$ $0,1\text{ М}$ розчину HCl . Розрахуйте масову частку нітратної кислоти у наважці.

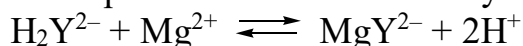
29. До розчину, що містить $0,7500\text{ г}$ $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, додали $25,00\text{ мл}$ розчину KOH , а потім надлишок останнього відтитрували $4,02\text{ мл}$ $0,125\text{ н}$ розчину HCl . Розрахуйте нормальну концентрацію KOH в розчині.

30. На титрування $0,05\text{ л}$ зразка води витрачено $4,8 \cdot 10^{-3}\text{ л}$ $0,1\text{ н}$ HCl . Чому дорівнює карбонатна твердість води?

4 МЕТОД КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ

Приклад 1. Розрахуйте масову частку магнію в алюмінієвому сплаві, якщо після розчинення 0,5000 г сплаву і видалення заважаючих елементів, об'єм розчину довели до 100 см³ і на титрування 20 см³ цього розчину витратили 12,06 см³ 0,01 М розчину трилону Б.

Розв'язання. Трилон Б ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na}^+ + \text{H}_2\text{Y}^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$) титрує йони Mg^{2+} з утворенням безбарвної комплексної сполуки:



У точці еквівалентності:

$$n_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+}) = n_{\text{екв}}(\text{H}_2\text{Y}^{2-});$$

$$c(1/2\text{Mg}^{2+}) \cdot V_{\text{аліквоти}}(\text{Mg}^{2+}) = c(1/2 \text{H}_2\text{Y}^{2-}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{H}_2\text{Y}^{2-}).$$

$$c(1/2\text{H}_2\text{Y}^{2-}) = c(\text{H}_2\text{Y}^{2-})/f_{\text{екв}}(\text{H}_2\text{Y}^{2-}) = 0,01/0,5 = 0,02 \text{ моль/л.}$$

$$c(1/2\text{Mg}^{2+}) = \frac{c(1/2\text{H}_2\text{Y}^{2-}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{H}_2\text{Y}^{2-})}{V_{\text{аліквоти}}(\text{Mg}^{2+})} = \frac{0,02 \cdot 12,06}{20,00} = 0,012 \text{ моль/л.}$$

Розрахуємо масу магнію в 100 см³ вихідного розчину:

$$c(1/2\text{Mg}^{2+}) = \frac{m(\text{Mg}^{2+})}{M(\text{Mg}^{2+}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{Mg}^{2+})},$$

$$m(\text{Mg}^{2+}) = c(1/2\text{Mg}^{2+}) \cdot M(\text{Mg}^{2+}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{Mg}^{2+}) = 0,012 \cdot 24,3 \cdot 1/2 \cdot 0,1 = 0,0146 \text{ г.}$$

$$M(\text{Mg}^{2+}) = 24,3 \text{ г/моль.}$$

Розрахуємо масову частку магнію в сплаві:

$$\omega(\text{Mg}^{2+}) = \frac{m(\text{Mg}^{2+})}{m(\text{сплава})} = \frac{0,0146}{0,5000} \cdot 100\% = 2,92\%.$$

Приклад 2. Для усунення твердості води до 100 л води додали 12 г гашеного вапна і 9,5 г кальцинованої соди. Розрахуйте, твердість води, що була усунена.

Розв'язання. Твердість води (T) зумовлена наявністю у воді солей кальцію і магнію. Вона визначає кількість ммоль-екв солей кальцію і магнію, що міститься в 1 л води:

$$T = \left[\frac{n_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+})}{V(\text{H}_2\text{O})} + \frac{n_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+})}{V(\text{H}_2\text{O})} \right] \cdot 1000, \text{ ммоль/л,}$$

$$\text{або } T = \frac{m(\text{X})}{M(\text{X}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{X}) \cdot V(\text{H}_2\text{O})} \cdot 1000, \text{ ммоль/л,}$$

де $n_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+})$, $n_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+})$ – кількість речовини еквівалента йонів кальцію або магнію (або їх солей), моль;

$m(\text{X})$ – маса йонів кальцію або магнію (або їх солей), г;

$M(\text{X})$ – молярна маса йонів кальцію або магнію (або їх солей), г/моль;

$f_{\text{екв}}(\text{X})$ – фактор еквівалентності йонів кальцію або магнію (або їх солей);

$V(\text{H}_2\text{O})$ – об'єм води, л.

Розрізняють карбонатну (тимчасову) і некарбонатну (постійну) твердість води.

Карбонатна твердість води зумовлена наявністю кальцій і магній гідрогенкарбонатів – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ і $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$.

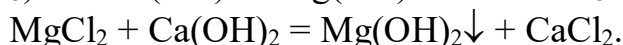
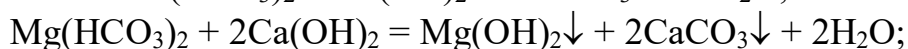
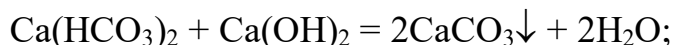
Некарбонатна твердість води зумовлена солями кальцію і магнію всіх інших кислот, окрім карбонатної (наприклад, хлоридами, сульфатами, нітратами тощо).

Згідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 величина загальної твердості води нормується двічі:

– як **фізико-хімічний показник**: загальна твердість повинна бути ≤ 7 ммоль/л;

– як **показник фізіологічної повноцінності води**: загальна твердість води має бути в межах 1,5–7 ммоль/л.

Для усунення карбонатної твердості води застосовують **гашене вапно** $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Цей реагент також переводить постійну магнієву твердість у постійну кальцієву твердість:

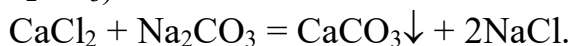


Кількість еквівалентів гідрогенкарбонатів дорівнює кількості еквівалентів реагенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$, тому карбонатну (кальцієва і магнієва) твердість води можна розрахувати:

$$T_{\text{к}} = \frac{m(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot V(\text{H}_2\text{O})} \cdot 1000 = \frac{12 \cdot 1000}{74 \cdot 1/2 \cdot 100} = 3,2 \text{ ммоль/л.}$$

$$M(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 74 \text{ г/моль}, f_{\text{екв}}(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 1/2.$$

Для усунення некарбонатної (постійної) твердості застосовують **кальціновану соду** (Na_2CO_3):



Кількість еквівалентів солей кальцію і магнію (не гідрогенкарбонатів) дорівнює кількості еквівалентів реагенту Na_2CO_3 , тому некарбонатну твердість води можна розрахувати

$$T_{\text{нк}} = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) \cdot V(\text{H}_2\text{O})} \cdot 1000 = \frac{9,5 \cdot 1000}{106 \cdot 1/2 \cdot 100} = 1,8 \text{ ммоль/л.}$$

$$M(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 106 \text{ г/моль}, f_{\text{екв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 1/2.$$

Отже загальна твердість води дорівнює

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{к}} + T_{\text{нк}} = 3,2 + 1,8 = 5,0 \text{ ммоль/л.}$$

Таким чином, вапняно-содовим методом було усунено 5 одиниць твердості води.

Приклад 3. На титрування 50 мл проби води в присутності ЕХЧ було витрачено 6 мл 0,05 н розчину трилону Б, а на титрування 50 мл води в присутності мурексиду – 4,5 мл трилону Б. Які показники якості води можна визначити за цими даними? Чи придатна вода для питних цілей?

Розв'язання. За цими даними можна визначити:

1. Загальну твердість води ($T_{\text{заг}}$), яка визначається титруванням проби води трилоном Б в присутності ЕХЧ за рН = 9,2 і розраховується як

$$T_{\text{заг}} = \frac{c(1/2\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot 1000}{V(\text{H}_2\text{O})} = \frac{6 \cdot 0,05 \cdot 1000}{50} = 6 \text{ ммоль/л.}$$

де $c(1/2\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ – молярна концентрація еквівалента трилону Б у розчині, ммоль/л;

$V(\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ – об'єм розчину трилону Б, який витрачено на титрування, мл;

$V(\text{H}_2\text{O})$ – об'єм проби води, взятої для титрування, мл.

2. Кальцієву твердість ($T(1/2\text{Ca}^{2+})$), яка визначається титруванням проби води трилоном Б в присутності мурексиду за рН=12, і розраховується:

$$T(1/2\text{Ca}^{2+}) = \frac{c(1/2\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot 1000}{V(\text{H}_2\text{O})},$$

$$T(1/2\text{Ca}^{2+}) = \frac{4,5 \cdot 0,05 \cdot 1000}{50} = 4,5 \text{ ммоль/л.}$$

3. Магнієву твердість ($T(1/2\text{Mg}^{2+})$), яка розраховується:

$$T(1/2\text{Mg}^{2+}) = T_{\text{заг}} - T(1/2\text{Ca}^{2+}) = 6 - 4,5 = 1,5 \text{ ммоль/л.}$$

4. Вміст іонів кальцію $Y(\text{Ca}^{2+})$ в мг/л, розраховують за формулою:

$$Y(\text{Ca}^{2+}) = T(1/2\text{Ca}^{2+}) \cdot M(\text{Ca}^{2+}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+}) = 4,5 \cdot 40,08 \cdot 1/2 = 90,2 \text{ мг/л,}$$

де $M(\text{Ca}^{2+})$ – молярна маса іонів кальцію, що дорівнює 40,08 г/моль;

$f_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+})$ – фактор еквівалентності іонів кальцію, $f_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+}) = 1/2$.

5. Вміст іонів магнію $Y(\text{Mg}^{2+})$ в мг/л, розраховують за формулою:

$$Y(\text{Mg}^{2+}) = T(1/2\text{Mg}^{2+}) \cdot M(\text{Mg}^{2+}) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Ca}^{2+}) = 1,5 \cdot 24,3 \cdot 1/2 = 18,2 \text{ мг/л,}$$

де $M(\text{Mg}^{2+})$ – молярна маса іонів магнію, що дорівнює 24,3 г/моль;

$f_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+})$ – фактор еквівалентності іонів кальцію, $f_{\text{екв}}(\text{Mg}^{2+}) = 1/2$.

Згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 (показники фізіологічної повноцінності питної води): загальна твердість води має бути в межах 1,5–7 ммоль/л, вміст іонів кальцію для питної води повинен бути в межах 25–75 мг/л, а вміст іонів магнію – в межах 10–50 мг/л. Отже, для даної води вміст іонів кальцію перевищує допустимий показники фізіологічної повноцінності питної води.

Контрольні задачі

1. Розрахуйте масу алюмінію, якщо до розчину, що містить йони Al^{3+} , додали 25 см³ 0,04 М розчину трилону Б, надлишок якого відтитрували 5 см³ 0,035 М розчином сульфату цинку.

2. Концентрація робочого розчину трилону Б була встановлена за розчином, що містить у 1 л 24,00 г $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. На титрування 10,00 мл цього розчину було витрачено 10,30 мл розчину трилону Б. Розрахуйте нормальну концентрацію трилону Б.

3. Розрахуйте загальну твердість води (ммоль-екв/л), якщо на титрування 100 мл води при $\text{pH} = 9,2$ в присутності ЕХЧ до синього забарвлення було витрачено 9,20 мл 0,1012 н розчину трилону Б.

4. Розрахуйте концентрацію цирконію в розчині, якщо після відповідної обробки, що усуває заважаючий вплив інших металів, на титрування 20,00 мл цього розчину з ЕХЧ до синього забарвлення було витрачено 10,15 мл 0,1000 н розчину трилону Б.

5. Розрахуйте концентрацію йонів кальцію і магнію (ммоль-екв/л і мг/л) в розчині за наступними даними: а) для визначення сумарної кількості йонів кальцію та магнію 20,00 мл аналізованого розчину відтитрували 2,00 мл 0,1120 н розчином трилону Б в присутності ЕХЧ; б) для визначення вмісту йонів кальцію до 20,00 мл розчину додали 2,20 мл 0,1120 н розчину трилону Б, надлишок якого відтитрували з мурексидом (до лілового забарвлення) 1,20 мл 0,1021 н розчином CaCl_2 .

6. Розрахуйте вміст молібдат-іонів MoO_4^{2-} у воді, якщо молібдат-іони спочатку осадили у вигляді CaMoO_4 . Осад відокремили, промили і перевели в розчин. Йони кальцію відтитрували 11,17 мл 0,05 М розчином трилону Б.

7. У мірній колбі об'ємом 100,0 мл розчинили технічний зразок $\text{NiSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ вагою 0,5370 г. До 15,00 мл цього розчину додали 25,00 мл 0,0108 М розчину трилону Б. На титрування надлишку трилону Б витратили 11,87 мл 0,0113 М розчину ZnSO_4 . Розрахуйте процентний вміст нікелю в технічному зразку.

8. В 1 л води міститься 36,47 мг йонів магнію й 50,1 мг йонів кальцію. Чому дорівнює твердість цієї води?

9. У мірній колбі об'ємом 200 мл розчинили 1,1256 г технічного зразка $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. До 20,00 мл цього розчину додали 25,00 мл 0,0124 М розчину трилону Б. На титрування надлишку трилону Б витратили 9,05 мл 0,0102 М розчину ZnSO_4 . Розрахуйте процентний вміст магнію в зразку.

10. На титрування 20,00 мл розчину, який отримали розчиненням 1,5250 г безводного (х.ч.) магній сульфату в мірній колбі на 500 мл, витрачається 19,55 мл розчину трилону Б. Визначить нормальну концентрацію трилону Б в розчині.

11. Для трилометричного визначення кальцію і магнію в мінералі, 2,0850 г його, після виконання необхідних операцій з видалення домішок, що заважають визначенню, розчинили і розбавили водою до мітки в мірній колбі на 250 мл. З цього розчину в конічні колби взяли дві аліквотні частини: 25,00 мл і 100,00 мл. На титрування першої з використанням аміачної буферної суміші й індикатора ЕХЧ було витрачено 11,20 мл 0,05240 н робочого розчину трилону Б, а на титрування другої з індикатором мурексидом при $\text{pH} = 12$ витратили 21,65 мл трилону Б. Розрахуйте процентний вміст кальцію і магнію в мінералі?

12. Який об'єм стічної води, що містить близько 0,4 г/л йонів кальцію, потрібно взяти для аналізу, щоб на титрування цієї аліквоти витрачалось близько 10 мл 0,1 М розчину трилону Б?

13. При визначенні загальної твердості води на титрування 50,00 мл її (після створення необхідних умов) витрачається 24,18 мл 0,005 М розчину трилону Б, на титрування 25,00 мл тієї ж води (в присутності мурексиду) витрачається 9,6 мл того ж розчину трилону Б. Визначити кальцієву і магнієву твердість води (в ммоль-екв/л і мг/л).

14. Яку наважку цинкової руди, що містить близько 15 % цинку, потрібно взяти для аналізу, щоб після розчинення і видалення заважаючих домішок, цинк відтитрувався 20 мл 0,1 М розчину трилону Б?

15. В 1 м³ води міститься 120 г магній сульфату і 162 г кальцій гідрогенкарбонату. Розрахуйте всі види твердості цієї води?

16. Після відповідної обробки 3,0340 г скла перевели в розчин, відокремили і замаскували заважаючі йони; об'єм розчину довели водою до 100,0 мл. Потім 20,00 мл отриманого розчину відтитрували 7,06 мл 0,0050 М розчину трилону Б у присутності сульфосаліцилової кислоти, як індикатора, при рН = 2. Визначить процентний вміст алюмінію у склі.

17. Скільки грамів Mn^{2+} містить 1 л стічної води, якщо після відповідної обробки 50 мл проби і маскування заважаючих визначенню марганцю елементів, на титрування витратили 15,42 мл 0,0050 М розчину трилону Б.

18. Яку наважку силікату, що містить близько 20 % Al_2O_3 , потрібно взяти для аналізу, щоб після відповідної обробки проби води алюміній був відділений і відтитрований 10 мл 0,1 М розчину трилону Б.

19. Наважку солі магнію 0,2000 г розчинили в мірній колбі ємністю 100 мл. На титрування 20,00 мл цього розчину витратили 20,25 мл 0,0250 М розчину трилону Б. Обчисліть відсотковий вміст магнію в солі.

20. Обчисліть процентний вміст $CaCO_3$ і $MgCO_3$ у вапняку, якщо після розчинення 1,000 г вапняку та відповідної його обробки, об'єм розчину довели водою до 100,0 мл, відібрали дві аліквотні частини по 20,00 мл, на титрування для визначення суми йонів кальцію та магнію витратили 19,25 мл 0,0514 М розчину трилону Б, а на титрування для визначення йонів кальцію витратили 6,26 мл того ж розчину трилону Б.

21. Який об'єм стічної води, що містить близько 1,83 г/л $Co(NO_3)_2$, потрібно взяти для аналізу, щоб на її титрування витрачалось близько 10 мл 0,1 М розчину трилону Б?

22. Скільки грамів металевого цинку треба розчинити в 100,00 мл сульфатної кислоти, щоб на титрування 20,00 мл цього розчину витрачалось 20,00 мл 0,2000 М розчину трилону Б?

23. На титрування 20,00 мл стічної води, що містить $NiCl_2$, витрачено 21,22 мл 0,0207 М розчину трилону Б. Визначити вміст солі нікелю у 10 м³ стічної води.

24. Визначить вміст плюмбум(II) ацетату в стічній воді, якщо на титрування 50,00 мл проби води, після відповідної підготовки, витрачено 5,84 мл 0,050 М розчину трилону Б.

25. Для усунення твердості води за вапняно-содовим методом до 50 л води додали 8 г гашеного вапна (кальцій гідроксиду) та 5,8 г кальцінованої соди (натрій карбонату). Розрахуйте усі види твердості води.

26. На титрування 50 мл води в присутності еріохрому чорного витрачено 12 мл 0,025 М розчину трилону Б, а на титрування 100 мл води в присутності метилоранжу – 7 мл 0,1 М розчину НСl. Розрахуйте всі форми твердості води. Чи придатна вода для питних цілей?

27. Для усунення твердості води за вапняно-содовим методом до 1 м³ води додали 100 г гашеного вапна (кальцій гідроксиду) та 106 г кальцінованої соди (натрій карбонату). Розрахуйте всі види твердості води. Запишіть рівняння реакцій.

28. На титрування 100 мл води в присутності еріохрому чорного витрачено 12 мл 0,025 М розчину трилону Б, а на титрування 100 мл води у присутності мурексиду 8 мл 0,025 М розчину трилону Б. Розрахуйте загальну твердість води, вміст йонів кальцію та магнію в ммоль-екв/л та мг/л.

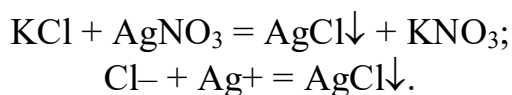
29. При термічній обробці 5 л води утворився осад кальцій карбонату масою 2 г. Визначить тимчасову твердість води і розрахуйте масу вапна (кальцій гідроксиду), яка потрібна для її усунення. Напишіть рівняння реакцій, що відповідають процесам термічного і вапняного методів пом'якшення води.

30. Розрахуйте масу кальцій хлориду в розчині, якщо на титрування цього розчину витрачено 20 мл 0,05 М розчину трилону Б. Як експериментально визначають вміст йонів кальцію і магнію у воді?

5 МЕТОД ОСАДЖЕННЯ. ДОБУТОК РОЗЧИННОСТІ. ВИПАДІННЯ ОСАДІВ

Приклад 1. Чи утвориться осад аргентум хлориду при змішуванні рівних об'ємів 0,01 М розчину KCl і 0,001 М розчину AgNO₃?

Розв'язання.



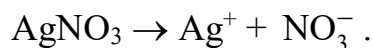
Для того, щоб визначити, чи буде утворюватися осад AgCl, необхідно:

- 1) розрахувати молярні концентрації речовин в розчині після змішування розчинів;
- 2) визначити молярні концентрації йонів, що утворюють осад;
- 3) знайти добуток молярних концентрацій йонів (*ДК*), що утворюють осад;
- 4) порівняти добуток молярних концентрацій йонів *ДК* з добутком розчинності *ДР*_{AgCl}.

Розрахуємо молярні концентрації KCl і AgNO₃ у розчині, що утворився після змішування. Оскільки при змішуванні рівних об'ємів розчинів загальний об'єм розчину зростає вдвічі, то молярні концентрації розчинів зменшуються вдвічі:

$$c(\text{KCl}) = \frac{0,01}{2} = 0,005 \text{ моль/л}; c(\text{AgNO}_3) = \frac{0,001}{2} = 0,0005 \text{ моль/л}.$$

Визначимо концентрації йонів Ag^+ і Cl^- :



$$[\text{Cl}^-] = c(\text{KCl}) = 0,005 \text{ моль/л}; [\text{Ag}^+] = c(\text{AgNO}_3) = 0,0005 \text{ моль/л}.$$

Розрахуємо DK йонів, що утворюють осад AgCl :

$$DK_{\text{AgCl}} = [\text{Ag}^+] \cdot [\text{Cl}^-] = 0,005 \cdot 0,0005 = 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

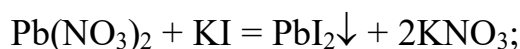
Порівняємо DK_{AgCl} з DP_{AgCl} , який згідно з даними **таблиці 1.1 Додатку 1** дорівнює $1,78 \cdot 10^{-10}$:

$$2,5 \cdot 10^{-6} > 1,78 \cdot 10^{-10}, \text{ тобто } DK_{\text{AgCl}} > DP_{\text{AgCl}}.$$

Отже, розчин пересичений, тому осад AgCl випаде.

Приклад 2. Чи випаде осад PbI_2 за 25°C при змішуванні 100 см^3 $0,0015 \text{ М}$ розчину $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ і 200 см^3 $0,0012 \text{ М}$ розчину KI ?

Розв'язання.

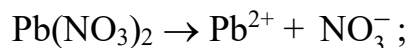


Розрахуємо молярні концентрації кожної солі після змішування:

$$c(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) = \frac{0,0015 \cdot 100}{300} = 0,0005 \text{ моль/л},$$

$$c(\text{KI}) = \frac{0,0012 \cdot 200}{300} = 0,0008 \text{ моль/л}.$$

Визначимо концентрації йонів:



$$[\text{Pb}^{2+}] = c(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) = 0,0005 \text{ моль/л}; [\text{I}^-] = c(\text{KI}) = 0,0008 \text{ моль/л}.$$

Розрахуємо DK йонів, що утворюють осад PbI_2 :

$$DK_{\text{PbI}_2} = [\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{I}^-]^2 = 5 \cdot 10^{-4} \cdot (8 \cdot 10^{-4})^2 = 3,2 \cdot 10^{-10}.$$

Порівняємо DK_{PbI_2} з DP_{PbI_2} , який згідно з даними **табл. 1.1 Додатку 1** дорівнює $1,1 \cdot 10^{-9}$. Очевидно, що $DK_{\text{PbI}_2} < DP_{\text{PbI}_2}$, розчин ненасичений і осад не буде випадати.

Приклад 3. Розчинність магній гідроксиду за 25°C дорівнює $3,1 \text{ мг/дм}^3$. Обчисліть добуток розчинності $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Розв'язання. Розрахуємо молярну концентрацію $\text{Mg}(\text{OH})_2$ у насиченому розчині:

$$c(\text{Mg}(\text{OH})_2) = \frac{m(\text{Mg}(\text{OH})_2)}{M(\text{Mg}(\text{OH})_2) \cdot V_{\text{р-ну}}} = \frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 1} = 5,34 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}.$$

Розрахуємо добуток розчинності $\text{Mg}(\text{OH})_2$:

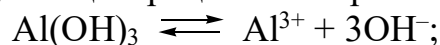
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	\rightleftharpoons	Mg^{2+}	+	2OH^-
1 моль		1 моль		2 моль
$5,34 \cdot 10^{-5}$		$5,34 \cdot 10^{-5}$		$2 \cdot 5,34 \cdot 10^{-5}$

$$DP_{Mg(OH)_2} = [Mg^{2+}] \cdot [OH^-]^2 = 5,34 \cdot 10^{-5} \cdot (1,068 \cdot 10^{-4})^2 = 6,09 \cdot 10^{-13}.$$

Приклад 4. За якої молярної концентрації Al^{3+} буде утворюватися осад алюміній гідроксиду з розчину, рН якого дорівнює 6? $DP_{Al(OH)_3} = 3,2 \cdot 10^{-34}$.

Розв'язання. Розрахуємо молярну концентрацію гідроксид-іонів у розчині. Оскільки рН = 6, то $[H^+] = 10^{-6}$ моль/л, тоді $[OH^-] = 10^{-14}/10^{-6} = 10^{-8}$ моль/л.

Розрахуємо молярну концентрацію Al^{3+} в розчині:



$$DP_{Al(OH)_3} = [Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3,$$

$$[Al^{3+}] = \frac{DP_{Al(OH)_3}}{[OH^-]^3} = \frac{3,2 \cdot 10^{-34}}{(10^{-8})^3} = 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ моль/л.}$$

Таким чином, при рН = 6 утворення осаду $Al(OH)_3$ починається за молярної концентрації алюміній-іонів більше, ніж $3,2 \cdot 10^{-10}$ моль/л.

Приклад 5. При +25 °С $DP_{BaSO_4} = 1,08 \cdot 10^{-10}$. Визначіть за цієї температури концентрацію йонів Ba^{2+} у насиченому розчині $BaSO_4$, який містить Na_2SO_4 у кількості 0,01 моль/л. Ступінь дисоціації Na_2SO_4 $\alpha = 0,88$.

Розв'язання. Добуток розчинності – константа за даної температури, тому збільшення концентрації йонів SO_4^{2-} у насиченому розчині $BaSO_4$ за рахунок дисоціації Na_2SO_4 має привести до зменшення концентрації йонів Ba^{2+} .

За рахунок натрій сульфату в насичений розчин $BaSO_4$ потрапляють йони SO_4^{2-} у кількості $c(Na_2SO_4) \cdot \alpha_{Na_2SO_4} = 0,01 \cdot 0,88 = 0,0088$ моль/л, рівновага дисоціації $BaSO_4 \rightleftharpoons Ba^{2+} + SO_4^{2-}$ зміщується в бік кристалізації $BaSO_4$ і концентрації йонів Ba^{2+} і SO_4^{2-} стають іншими:

$BaSO_4$	\rightleftharpoons	Ba^{2+}	+	SO_4^{2-}
X моль/л		X моль/л		$(X + 0,0088)$ моль/л

$$DP_{BaSO_4} = [Ba^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] = X \cdot (X + 0,0088) = 1,08 \cdot 10^{-10},$$

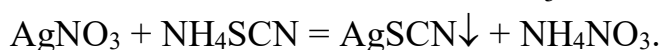
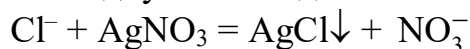
$$X^2 + 0,0088X = 1,08 \cdot 10^{-10}.$$

Значення X дуже мале ($X \ll 0,0088$), тому ним можна знехтувати.

Тоді $0,0088X = 1,08 \cdot 10^{-10}$; $X = 0,12 \cdot 10^{-7}$ моль/л. Концентрація йонів Ba^{2+} становить $0,12 \cdot 10^{-7}$ моль/л.

Приклад 6. До розчину речовини, що містить йони хлору, додали 30 мл 0,1092 н розчину $AgNO_3$, надлишок якого відтитрували 0,6 мл 0,1105 н розчину NH_4SCN . Наважка речовини дорівнює 0,2154 г. Розрахуйте масову частку хлорид-іонів у наважці.

Розв'язання. В розчині відбуваються дві хімічні реакції:



$$n_{\text{екв}}(\text{AgNO}_3) = n_{\text{екв}}(\text{Cl}^-) + n_{\text{екв}}(\text{NH}_4\text{SCN}),$$

$$c_{\text{н}}(\text{AgNO}_3) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{AgNO}_3) = m(\text{Cl}^-) / (M(\text{Cl}^-) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Cl}^-)) + c_{\text{н}}(\text{NH}_4\text{SCN}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{NH}_4\text{SCN}),$$

$$m(\text{Cl}^-) = (c_{\text{н}}(\text{AgNO}_3) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{AgNO}_3) - c_{\text{н}}(\text{NH}_4\text{SCN}) \cdot V_{\text{р-ну}}(\text{NH}_4\text{SCN})) \cdot M(\text{Cl}^-) \cdot f_{\text{екв}}(\text{Cl}^-) =$$

$$= (30 \cdot 0,1092 - 0,6 \cdot 0,1105) \cdot 35,45 \cdot 1 = 113,78 \text{ мг} = 0,1138 \text{ г}.$$

$$\omega(\text{Cl}^-) = \frac{m(\text{Cl}^-)}{m(\text{наважки})} = \frac{0,1138}{0,2154} \cdot 100 \% = 52,83 \ \%.$$

Контрольні задачі

Значення ДР для електролітів наведені в таблиці 1.1 додатку А, табл. А.1.

1. На титрування 20,00 мл 0,05 н розчину NaCl витрачено 19,64 мл розчину AgNO₃. Визначить нормальну концентрацію розчину AgNO₃.

2. У деяких випадках воду знезаражують йонами срібла. Концентрація йонів хлору в оброблюваній воді становить 0,0015 моль/л. Чи утворюється осад AgCl, якщо до 10 м³ води додати 20 г AgNO₃?

3. 1,4960 г KCl (х.ч.) розчинили в мірній колбі на 200 мл. Скільки мілілітрів 0,1000 н розчину AgNO₃ витратиться на титрування 20,00 мл розчину KCl?

4. В 1 л водного розчину міститься по 20 мг йонів срібла і свинцю. Яка сіль випаде в осад раніше, якщо до цього розчину додавати краплями розчин калій хромату?

5. Скільки міліграмів NaCl містить 1 л розчину, якщо на титрування 20,00 мл цього розчину було витрачено 18,62 мл 0,1000 н розчину AgNO₃.

6. Скільки грамів чистого срібла потрібно розчинити в нітратній кислоті та розбавити в мірній колбі об'ємом 100,0 мл, щоб на титрування 20,00 мл одержаного розчину витрачалось стільки ж 0,0500 н розчину NH₄SCN?

7. Розрахуйте наважку карналіту KCl·MgCl₂·6H₂O для аналізу на вміст хлорид-іонів, щоб після розчинення її й осадження 20,00 мл 0,1020 н розчину AgNO₃ на титрування надлишку аргентум нітрату було витрачено 25,00 мл розчину 0,0486 н розчину NH₄SCN.

8. 3,00 г NaCl розчинили в мірній колбі на 500 мл. Яким об'ємом 0,1000 н розчину AgNO₃ потрібно обробити 20,00 мл одержаного розчину, щоб на титрування надлишку срібла витрачалось 25,00 мл 0,0500 н розчину амоній тіоціанату?

9. Якою повинна бути наважка калій броміду, щоб після її розчинення на титрування розчину було витрачено не більше 25 мл 0,05 М розчину аргентум нітрату.

10. При яких значеннях рН і який з осадів – Fe(OH)₃ чи Mn(OH)₂ буде випадати першим при поступовому доданні розчину NaOH до суміші, яка вміщує 0,1 моль/дм³ MnCl₂ і 0,001 моль/дм³ FeCl₃?

11. У 20 мл розчину міститься 20 мг K₂CrO₄ і 15 мг K₂SO₄. До розчину додають невеликими порціями розчин Ca(NO₃)₂. Який осад буде осаджуватися першим? Відповідь підтвердить розрахунками.

12. Визначить розчинність кальцій фториду (CaF_2) у воді і в $0,05 \text{ M}$ розчині CaCl_2 . У скільки разів розчинність у другому випадку менша ніж у першому?

13. Скільки міліграмів KCN знаходиться в розчині, на титрування якого до точки еквівалентності потрібно $26,05 \text{ мл}$ $0,1015 \text{ н}$ розчину AgNO_3 ?

14. Розрахуйте нормальну концентрацію розчинів AgNO_3 і NH_4SCN , якщо при дії $30,00 \text{ мл}$ розчину AgNO_3 на $0,1173 \text{ г}$ NaCl надлишок йонів срібла відтитрували $3,20 \text{ мл}$ розчину NH_4SCN . Попередньо було визначено, що на титрування $20,00 \text{ мл}$ розчину AgNO_3 потрібно $21,00 \text{ мл}$ розчину NH_4SCN .

15. Скільки грамів NaCl містить 1 л розсолу, якщо після розведення $10,00 \text{ мл}$ його в мірній колбі на 500 мл на титрування $25,00 \text{ мл}$ розчину знадобиться $24,42 \text{ мл}$ $0,1 \text{ н}$ розчину AgNO_3 ?

16. У мірну колбу об'ємом 250 мл вмістили $25,00 \text{ мл}$ розведеної HCl і довели дистильованою водою до позначки. На титрування $20,00 \text{ мл}$ цього розчину витрачено $24,37 \text{ мл}$ $0,9850 \text{ н}$ розчину AgNO_3 . Скільки грамів хлоридної кислоти міститься в 1 л досліджуваного розчину?

17. Скільки грамів KCl містить 250 мл розчину, якщо на титрування $25,00 \text{ мл}$ його витрачено $17,00 \text{ мл}$ $0,0525 \text{ н}$ розчину AgNO_3 ?

18. Визначити, чи буде утворюватися осад, якщо до 100 мл $0,001 \text{ M}$ розчину PbSO_4 додати 200 мл розчину NaI з концентрацією $0,15 \text{ г/л}$?

19. На титрування розчину, отриманого розчиненням $0,2082 \text{ г}$ NaBr , витрачено $22,80 \text{ мл}$ розчину $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2$. На титрування $20,00 \text{ мл}$ $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2$ витрачено $19,82 \text{ мл}$ розчину NH_4SCN . Визначити нормальну концентрацію NH_4SCN в розчині.

20. При якому значенні pH почне утворюватися осад $\text{Fe}(\text{OH})_2$ із $0,1 \text{ M}$ розчину ферум (II) сульфату, якщо до нього приливати розчин NaOH ?

21. При аналізі срібного сплаву, що містить 85% срібла, взяли наважку $0,5000 \text{ г}$. Якою повинна бути нормальна концентрація KSCN в розчині, щоб на титрування було витрачено $50,00 \text{ мл}$ цього розчину?

22. Чи буде випадати осад манган (II) карбонату, якщо до $0,02 \text{ M}$ розчину MnCl_2 додати такий же об'єм $0,03 \text{ M}$ розчину Na_2CO_3 .

23. До 100 мл насиченого розчину аргентум хлориду додали $1,7 \text{ мг}$ аргентум нітрату. Розрахуйте концентрацію хлорид-іонів у розчині.

24. До насиченого розчину кальцій сульфату додали рівний об'єм розчину $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$ амоній оксалату. Чи буде утворюватися осад кальцій оксалату?

25. Визначить і порівняйте розчинність кальцій карбонату (г/л) у чистій воді і в розчині соди (Na_2CO_3) з концентрацією $0,1 \text{ моль/л}$ при $+25^\circ\text{C}$? У скільки разів розчинність CaCO_3 у воді більша за розчинність в розчині соди?

26. У скільки разів зменшиться концентрація йонів срібла в насиченому розчині аргентум хлориду, якщо до нього додати стільки хлоридної кислоти, щоб концентрація кислоти в розчині виявилася рівною $0,03 \text{ моль/л}$?

27. Добуток розчинності аргентум фосфату дорівнює $1,8 \cdot 10^{-18}$, а аргентум хромату – $4,05 \cdot 10^{-12}$ при 25°C . Яка з цих солей дасть меншу концентрацію йонів срібла в насиченому розчині при 25°C .

28. Яка має бути мінімальна концентрація KBr, щоб при додаванні до його розчину рівного об'єму 0,003 н розчину AgNO₃ утворився осад? Ступінь дисоціації цих електролітів прийняти такими, що дорівнюють одиниці.

29. Чи випаде осад плюмбум (II) хлориду, якщо до 10 мл 0,01 М розчину плюмбум(II) нітрату долити 10 мл 0,01 М розчину натрій хлориду?

30. Визначить масову частку срібла в сплаві, якщо після розчинення його наважки вагою 0,5000 г в нітратній кислоті на титрування отриманого розчину було витрачено 24,90 см³ 0,1600 М розчину NH₄SCN.

6 ДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ. СПОСОБИ ОДЕРЖАННЯ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ. БУДОВА МІЦЕЛ ГІДРОЗОЛІВ

Із класифікації колоїдних систем за розміром частинок випливає, що колоїдні розчини займають проміжне положення між молекулярними та грубодисперсними системами. Цим і визначають два можливі методи одержання колоїдних розчинів: метод конденсації та метод диспергування.

Метод конденсації полягає в укрупненні частинок у процесі агрегації молекул або йонів. Конденсація може відбуватися як фізичний, або хімічний процес. В обох цих випадках у гомогенному середовищі утворюється нова фаза, яка має колоїдну дисперсність. Спільною умовою утворення нової фази є стан пересичення розчину або пари. При виникненні місцевих пересичень у розчині утворюються агрегати із декількох молекул, які і стають зародками нової фази.

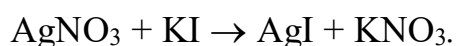
У випадку хімічної конденсації нова фаза виникає під час хімічної реакції, яка призводить до утворення нерозчинних у даному середовищі речовин. Це можуть бути реакції відновлення, окислення, обміну, гідролізу. При цьому колоїдний розчин може бути отриманий тільки за умови, що швидкість утворення зародків набагато більша швидкості їх росту.

Для різних хімічних реакцій, які використовують при одержанні золів, оптимальні умови утворення і росту зародків підбирають дослідним шляхом. Як правило, високодисперсні золі отримують внесенням до розведеного розчину одного із реактивів невеликої кількості концентрованого розчину іншого реактиву під час інтенсивного перемішування. За такою методикою утворені зародки твердої фази швидко зупиняють зростання через те, що кількість речовини у розбавленому розчині скоро вичерпується.

Відповідно до загальноприйнятої міцелярної теорії будови колоїдних розчинів золь складається з двох частин: міцел (дисперсної фази) та інтерміцелярної рідини (дисперсійного середовища).

Міцела – це структурна колоїдна одиниця, тобто частинка дисперсної фази, обгорнута подвійним електричним шаром (ПЕШ). *Інтерміцелярна рідина* – це дисперсійне середовище, яке розподіляє міцели, в якому розчинені електроліти, неелектроліти, ПАР, що стабілізують колоїдну систему.

Розглянемо будову міцели йодиду срібла, якщо золь утворюється за реакцією:

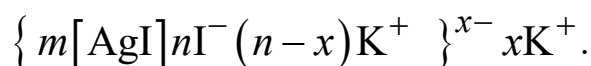


Основою колоїдної частинки є електронейтральний *агрегат*, що складається з декількох сотень або тисяч атомів, являє собою мікрокристали важкорозчинної сполуки (в нашому випадку m пар йонів Ag^+ і I^-). На рисунку 3.1 схематично зображена міцела AgI .

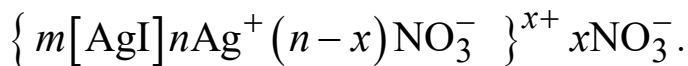
Така система може існувати тільки в присутності стабілізатора, що здатний підтримувати початковий ступінь дисперсності. Стабілізатором може бути електроліт, в якому міститься іон, що спроможний до вибіркової адсорбції на поверхні даної твердої фази. Вибіркова адсорбція відбувається відповідно до *правила Панета-Фаянса*: це йони, які входять до складу кристалічної ґратки або ізоморфні їм. Отже, для утворення золю йодиду срібла стабілізатором може бути як AgNO_3 , так і KI .

Якщо реакція відбуватиметься в надлишку KI , то на поверхні агрегата будуть адсорбуватися йони I^- , їх кількість n . Йони йодиду є потенціалвизначальними (ПВІ), визначають потенціал і заряд поверхні. Агрегат разом з ПВІ називають *ядром* колоїдної частинки. Під дією електростатичних сил до ядра притягується n йонів протилежного знака – протиіони, які компенсують заряд ядра. У даному випадку цю роль виконують йони K^+ . Частина протиіонів ($n - x$), які найближче розташовані до ядра, перебувають у шарі рідини і створюють адсорбційний шар або шар Штерна. На ці йони діють не тільки електростатичні, а й ван-дер-ваальсові сили ядра. Ядро разом з адсорбційним шаром протиіонів називають *гранулою* (або колоїдною частинкою). Решта x протиіонів, які нейтралізують заряд поверхні та які слабкіше зв'язані з ядром (тільки електростатичними силами), розташовуються під впливом теплового руху в рідкій фазі дифузно. Тому цей шар називають дифузним. Гранула разом з дифузною частиною ПЕШ і називається *міцелою*. Числа m , n та x можуть змінюватися в широких межах і залежно від умов одержання та очистки золів. Зазвичай $m \gg n$. Міцели золів завжди електронейтральні.

Структуру міцели можна зобразити схематично або записати формулою:



Якщо золь AgI одержано в умовах надлишку AgNO_3 , то формула міцели набуває вигляду:



←-----→ агрегат

←-----→ ядро

←-----→ частинка (гранула)

←-----→ міцела

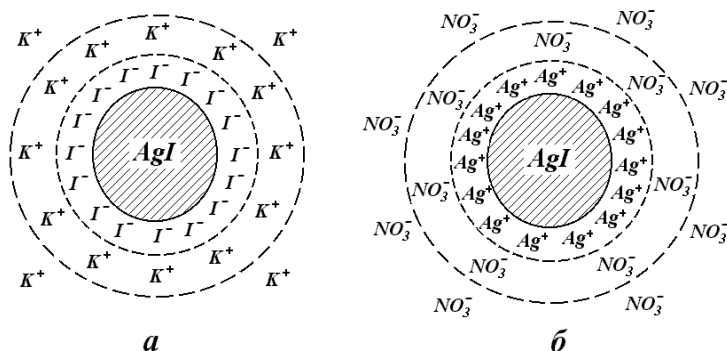
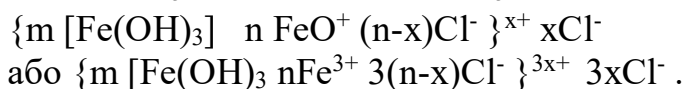


Рисунок 6.1 – Схема будови колоїдної міцели золю аргентум йодиду:
a – при надлишку KI ; *б* – при надлишку $AgNO_3$

Приклад 1. Напишіть формулу міцели ферум(III)гідроксиду, за умови, що гідрозоль одержаний гідролізом $FeCl_3$.



Приклад 2. Золь аргентум хлориду був одержаний додаванням 15 см^3 водного розчину калій хлориду з концентрацією $0,025 \text{ моль/дм}^3$ до 85 см^3 водного розчину аргентум нітрату з концентрацією $0,005 \text{ моль/дм}^3$. Напишіть формулу міцели.

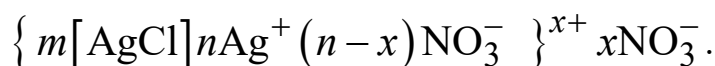
Розв'язання. Визначаємо реагент, що знаходиться в надлишку:

$$n(KCl) = c(KCl) \cdot V = 0,025 \cdot 0,015 = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ моль},$$

$$n(AgNO_3) = c(AgNO_3) \cdot V = 0,005 \cdot 0,085 = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ моль},$$

$$n(AgNO_3) > n(KCl).$$

У розчині є надлишок аргентум нітрату, тому потенціал визначальними йонами будуть іони Ag^+ . Формула міцели має вигляд:



←-----→ агрегат

←-----→ ядро

←-----→ частинка (гранула)

←-----→ міцела

Частинка, або гранула, заряджена позитивно.

Контрольні задачі

1. Золь кальцій сульфату був отриманий при змішуванні $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ розчину $CaCl_2$ з молярною концентрацією еквівалента $0,05 \text{ кмоль/м}^3$ з 2 % розчином H_2SO_4 об'ємом $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і густиною 1012 кг/м^3 . Напишіть формулу міцели. Як будуть переміщуватися заряджені частинки в електричному полі?

2. Який об'єм 2 % розчину натрій гідроксиду ($\rho = 1021 \text{ кг/м}^3$) необхідно додати до $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ розчину $FeCl_3$, молярна концентрація еквівалента якого

дорівнює 0.1 кмоль/м^3 , щоб отримати негативно заряджені частинки? Напишіть формулу міцели.

3. Золь отримали при змішуванні розчинів BaCl_2 ($V = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $c = 0,0001 \text{ кмоль/м}^3$) і H_2SO_4 ($V = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $c = 0,001 \text{ кмоль/м}^3$). Напишіть формулу міцели.

4. Який об'єм $5 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль/м}^3$ розчину AgNO_3 необхідно додати до $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ розчину KJ , концентрація якого становить $0,015 \text{ кмоль/м}^3$, щоб отримати золь з позитивно зарядженими частинками? Напишіть формулу міцели.

5. Який об'єм розчину FeCl_3 , молярна концентрація якого $0,001 \text{ моль/л}$, необхідно додати до $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ розчину AgNO_3 концентрації $2 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль/м}^3$, щоб частинки золю в електричному полі рухались до аноду? Напишіть формулу міцели.

6. Напишіть формулу міцели золю, який отримали при змішуванні $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ розчину KJ молярної концентрації $0,0025 \text{ кмоль/м}^3$ і $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ розчину $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ молярної концентрації $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кмоль/м}^3$.

7. Золь берлінської лазури був отриманий при додаванні до 100 см^3 $0,005 \text{ моль/дм}^3$ розчину $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ $0,5 \text{ см}^3$ $0,1 \text{ моль/дм}^3$ розчину ферум (III) хлориду. Напишіть формулу міцели. Який заряд мають частинки золю? Яким методом можна визначити цей заряд?

8. Золь аргентум хлориду був отриманий змішуванням рівних об'ємів розчинів калій хлориду з концентрацією $0,0095 \text{ моль/дм}^3$ і аргентум нітрату з концентрацією $0,012 \text{ моль/дм}^3$. Напишіть формулу міцели. Який заряд мають частинки золю?

9. Запишіть формулу міцели золю, який був отриманий при додаванні $1,5 \text{ см}^3$ $0,05 \text{ моль/дм}^3$ розчину кобальт(II) нітрату до 25 см^3 $0,003 \text{ моль/дм}^3$ розчину $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$.

10. Який об'єм розчину аргентум нітрату з концентрацією $0,005 \text{ моль/дм}^3$ потрібно додати до 25 см^3 розчину натрій бромиду з концентрацією $0,016 \text{ моль/дм}^3$, щоб одержати золь з негативно зарядженими частинками? Напишіть формулу міцели золю.

11. Золь арсен(III) сульфиду добувають як результат взаємодії As_2O_3 і H_2S . Який метод одержання колоїдних розчинів демонструє цей дослід? Запишіть можливі формули міцели золю.

12. Золь барій сульфату отриманий змішуванням рівних об'ємів розчинів барій нітрату і сульфатної кислоти. Напишіть формулу міцели. Чи однакові вихідні концентрації електролітів, якщо в електричному полі гранула рухається до аноду?

13. Однією з причин помутніння сірководневої води при стоянні на повітрі є утворення гідрозолю сірки. Запишіть рівняння хімічної реакції, що відбувається в цих умовах, а також найбільш ймовірну формулу міцели. До якого методу відноситься утворення цього золю?

14. Золь AgI отриманий при додаванні 8 см^3 водного розчину KI концентрації $0,05 \text{ моль/дм}^3$ до 10 см^3 водного розчину AgNO_3 концентрації

0,02 моль/дм³. Напишіть формулу міцели золю, що утворився. Який заряд мають частинки золю?

15. Золь ферум(III) гідроксиду отримано при додаванні до 85 см³ кип'ячої дистильованої води 15 см³ 2 % розчину ферум(III) хлориду. Напишіть формулу міцели золю Fe(OH)₃, враховуючи, що при утворенні частинок ферум(III) гідроксиду в розчині присутні такі йони: Fe⁺³, Cl⁻. Як заряджені частинки золю?

16. Напишіть формулу міцели золю, що утворився при взаємодії барій хлориду з деяким надлишком натрій сульфату. До якого електроду повинні рухатися частинки барій сульфату?

7 Поверхневі явища. Поверхневий натяг. Поверхнево-активні речовини (ПАР). Адсорбція: молекулярна адсорбція, основні поняття та визначення; адсорбенти; ізотерма адсорбції. Адсорбція на твердих адсорбентах як метод очищення води від розчинених органічних домішок

Термін *адсорбція* було введено для позначення поглинання речовини поверхнею (по лат. sorbeo – «поглинаю», ad – «на»).

Адсорбцією називають зміну концентрації компонента в поверхневому шарі у порівнянні з об'ємною фазою, яка віднесена до одиниці площі поверхні. Або адсорбція – це самодовільний процес перерозподілу компонентів системи між поверхневим шаром та об'ємною фазою. Це процес концентрування або накопичення газуваної чи розчиненої речовини на межі розділу фаз. При перерозподілі компонентів в поверхневий шар переважно переходить той компонент, який сильніше зменшує поверхневий або міжфазний натяг (σ).

У загальному випадку адсорбція може проходити не тільки завдяки прагненню поверхневої енергії до зменшення. Вона може бути результатом хімічної взаємодії компонента з поверхнею речовини (хемосорбція) і тоді поверхнева енергія може навіть зростати на фоні зменшення енергії всієї системи.

Термін «адсорбція» об'єднує дуже широке коло явищ, що мають місце при наявності поверхні розподілу між фазами. Найбільш практичне значення має адсорбція поверхнево-активних речовин і адсорбція домішок з газу або рідини спеціальними вискоєфективними адсорбентами. В якості адсорбентів можуть бути використані різноманітні матеріали з високою питомою поверхнею: пористий вуглець (найбільш поширена форма – активоване вугілля), силікагелі, цеоліти, а також деякі інші групи природних мінералів і синтетичних речовин. Адсорбція є одним з методів фізико-хімічного очищення стічних вод від домішок забруднюючих речовин.

Сорбційні методи полягають у виділенні органічних і неорганічних забруднень на природних або синтетичних сорбентах, а також у використанні іонселективних матеріалів.

Речовину, на поверхні якої проходить адсорбція, називають *адсорбентом*. Адсорбент може бути твердим або рідким.

Речовину, що адсорбується на поверхні твердого або рідкого тіла, називають *адсорбтивом*, адсорбовану речовину – *адсорбатом*.

Таким чином, адсорбтив адсорбується на поверхні адсорбенту.

Якщо концентрація компонента в поверхневому шарі збільшується в порівнянні з об'ємною фазою, то говорять про його позитивну адсорбцію (поверхнево-активні речовини – ПАР), якщо ж концентрація компонента в поверхневому шарі зменшується в порівнянні з об'ємною фазою, то мова йде про негативну адсорбцію (поверхнево-інактивні речовини – ПІР).

Зворотний процес переходу речовини з поверхневого шару в об'ємну фазу називають *десорбцією*.

У залежності від агрегатного стану суміжних фаз розрізняють :

- адсорбцію газів на твердих адсорбентах;
- адсорбцію розчинних речовин на межах «тверде тіло-рідина» і «рідина-рідина»;
- адсорбцію на межі «рідина-газ».

Кількісно адсорбція може бути визначена за допомогою таких величин:

1) адсорбція « a » – це кількість адсорбату в об'ємі адсорбційного шару, віднесена до одиниці маси адсорбенту, (моль/г);

2) адсорбція « a » – це кількість адсорбованої речовини на одиниці поверхні адсорбенту, (моль/м²);

3) адсорбція Гіббса « Γ » – це надлишок кількості моль адсорбату в об'ємі поверхневого шару площею 1 м² порівняно з кількістю його моль у тому самому об'ємі за умов, що біля міжфазної межі не відбувалося зміни концентрації (моль/м²).

Так як поверхня твердого адсорбенту пориста і величина площі поверхні, як правило, не відома, адсорбцію на твердих адсорбентах зазвичай відносять не до одиниці площі, а до одиниці маси адсорбенту (моль/г).

Відповідно до II закону термодинаміки компонент буде адсорбуватися на межі фаз, якщо результатом адсорбції буде зменшення вільної поверхневої енергії Гіббса ($G_s = \sigma \cdot s$), тобто, якщо буде зменшуватися поверхневий натяг (при незмінній площі поверхні розділу фаз).

Кількісна залежність між величиною адсорбції Γ , концентрації речовини в розчині C і зменшенням поверхневого натягу виражається рівнянням Гіббса:

$$\Gamma = - \frac{c}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc}.$$

Величину $G = - \frac{d\sigma}{dc}$ називають поверхневою активністю речовини, що адсорбується; вона характеризує здатність цієї речовини до адсорбції. Це рівняння використовують при вивченні адсорбції на межі «рідина-газ» і «рідина-рідина», тому що у цих випадках поверхневий натяг можна визначити експериментально. При поглинанні розчинених речовин твердими адсорбентами, адсорбція не може бути розрахована за рівнянням Гіббса, так як не має прийнятих методів вимірювання поверхневого натягу на межі розділу «тверда речовина-рідина».

Графічну залежність величини адсорбції від рівноважної концентрації при сталій температурі називають ізотермою адсорбції (рис. 5.1).

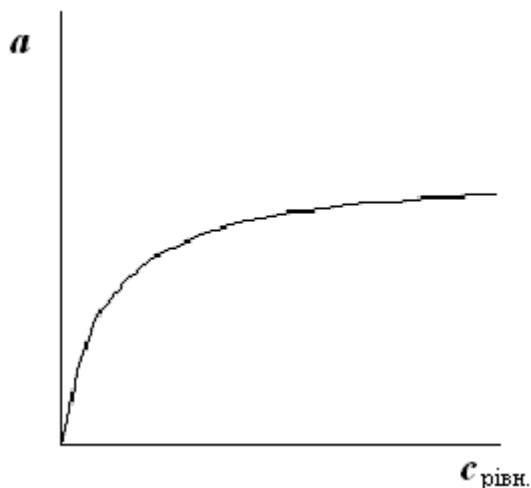


Рисунок 7.1 – Ізотерма моношарової адсорбції

Адсорбційну рівновагу в системі «твердий адсорбент-розчин» можна охарактеризувати за допомогою емпіричного рівняння Фрейндліха, який показав, що при постійній температурі число молей адсорбованого газу, або розчиненої речовини, що припадає на одиницю маси адсорбенту (так звана питома адсорбція $\frac{x}{m}$), пропорційно рівноважному тиску (для газу), або рівноважній концентрації (для речовин, що адсорбуються з розчину) адсорбату, що зведений в деяку ступінь, яка завжди менше одиниці:

$$a = \frac{x}{m} = kp^{1/n}, \quad a = \frac{x}{m} = kc^{1/n},$$

де a – величина адсорбції (моль/г);

x – кількість адсорбованої речовини (моль);

m – маса адсорбенту (г);

p – рівноважний тиск речовини (Па);

c – рівноважна концентрація речовини в розчині (моль/дм³);

k і n – сталі величини.

Фізичний сенс константи рівноваги k полягає в тому, що вона дорівнює величині адсорбції при рівноважній концентрації адсорбату рівній одиниці. Константа рівноваги залежить від природи адсорбенту і адсорбату. Значення адсорбційного показника $\frac{1}{n}$ знаходиться в межах 0,1÷1 і залежить від температури і природи адсорбату.

З метою визначення констант рівняння Фрейндліха (k і n), його приводять до вигляду прямої логарифмуванням:

$$\lg a = \lg k + \frac{1}{n} \lg c.$$

Графік, що побудований у координатах $\lg a - \lg c$, є прямою лінією, яка відтинає на ординаті відрізок, що дорівнює $\lg k$, а тангенс кута нахилу прямої до

осі абсцис дорівнює за величиною показнику ступеня при тиску або концентрації $\frac{1}{n}$ (рис. 5.2).

Побудувавши лінійну залежність $\lg a$ від $\lg c$ визначають параметри n і k .

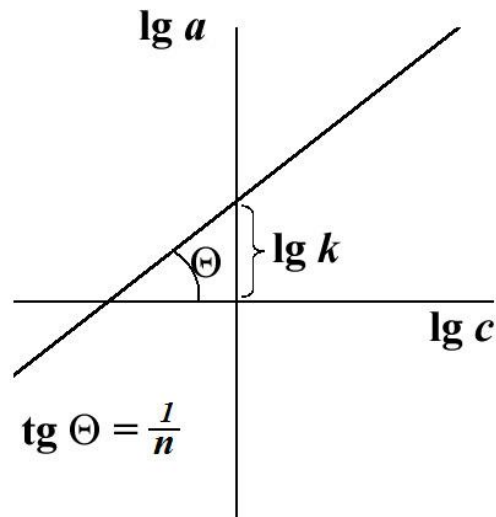


Рисунок 7.2 – Графічний метод визначення параметрів рівняння Фрейндліха

Це рівняння є емпіричним і придатне головним чином для середніх концентрацій.

У 1917 році Ленгмюром було виведене рівняння для опису адсорбції з розчину або газової фази на твердій поверхні. Воно служить досить хорошим наближенням, якщо граничній адсорбції відповідає монослой адсорбованих молекул, які не взаємодіють між собою, і якщо між адсорбцією і десорбцією встигає встановитися рівновага. Для опису адсорбції з розчину, рівняння Ленгмюра має вигляд:

$$a = a_{\infty} \frac{Kc}{1 + Kc}.$$

Оскільки концентрація газів і парів практично пропорційна тиску, то для них ізотерма адсорбції Ленгмюра має вигляд:

$$a = a_{\infty} \frac{K_p P}{1 + K_p P}.$$

Для знаходження a_{∞} і K рівняння ізотерми приводять до наступного вигляду:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{a_{\infty}} + \frac{1}{a_{\infty} \cdot K \cdot c}.$$

Зображуючи експериментальні дані a і c в координатах $1/a$ від $1/c$, знаходять a_{∞} і K (рис. 7.3).

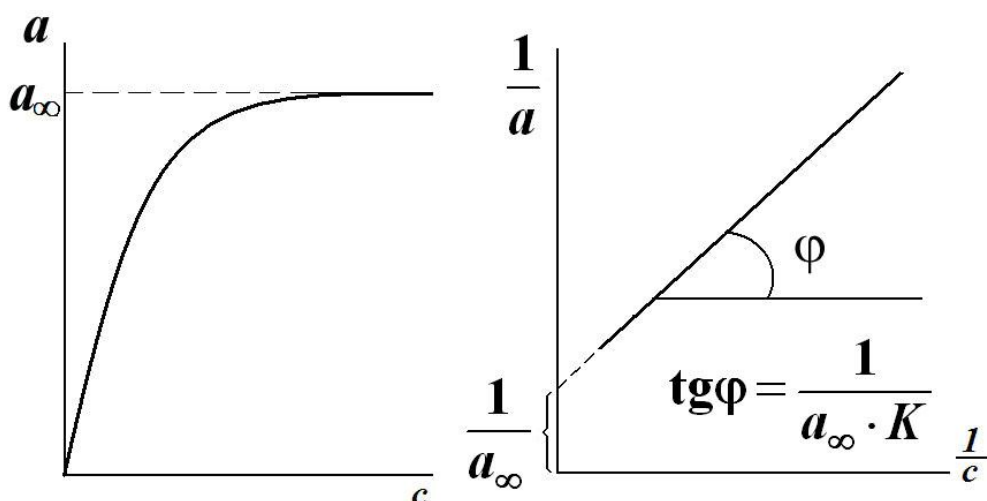


Рисунок 7.3 – Ізотерма адсорбції Ленгмюра

Адсорбція на межі «тверде тіло – рідина».

Молекулярна адсорбція із розчинів на твердій поверхні

При розгляді адсорбції газів і пари на твердих адсорбентах припускалось, що до адсорбції поверхня адсорбенту вільна від молекул адсорбтива і вона поступово заповнюється адсорбтивом з ростом тиску відповідно ізотермі адсорбції.

При адсорбції з рідких розчинів поверхня адсорбенту завжди повністю зайнята молекулами розчинника і розчиненої речовини.

Розчинена речовина може адсорбуватися тільки витісняючи з поверхневого шару молекули розчинника, тобто проходить обмінна молекулярна адсорбція.

При розгляді адсорбції із розчину на твердому тілі прийнято розрізняти два випадки: адсорбцію неелектролітів, коли адсорбуються молекули адсорбтива і адсорбцію електролітів, коли адсорбується вибірково один із йонів електроліту.

У випадку адсорбції із розчинів час встановлення рівноваги зазвичай значно більший, оскільки він визначається дифузією.

Кількість адсорбованої речовини на одиницю маси адсорбенту виражає формула:

$$a = \frac{(c_0 - c_{\text{рівн}}) \cdot V}{m} \text{ моль/г,}$$

де c_0 – вихідна молярні концентрації (моль/дм³);

$c_{\text{рівн}}$ – рівноважна молярна концентрації (моль/дм³);

V – об'єм розчину (дм³);

m – маса адсорбенту (г).

Залежність молекулярної адсорбції із розчину на твердому тілі від концентрації характеризується звичайною ізотермою адсорбції, і для досить розбавлених розчинів добре описується рівняннями Фрейндліха і Ленгмюра. Дійсно для описування адсорбції із розчину на твердому тілі використовують і рівняння Гіббса, але на жаль, складність визначення σ на межі

«тверде тіло – рідина» не дозволяє безпосередньо використовувати його в цьому випадку.

Приклад 1. Розрахуйте адсорбцію гептанолу на основі концентраційної залежності поверхневого натягу його водних розчинів при 293 К:

c , моль/дм ³	0	0,040	0,100	0,200	0,316	0,500	0,794	1,000;
σ , мДж/м ²	72,7	71,4	70,9	70,0	69,2	68,2	67,2	66,8.

Визначте константу рівняння Ленгмюра, площу, яку займає одна молекула в насиченому адсорбційному шарі, й товщину адсорбційного шару. Густина гептанолу при даній температурі дорівнює 0,824 г/см³.

Розв'язання. Використовуючи рівняння Гіббса $\Gamma = -\frac{c}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc}$, можна знайти

величину адсорбції Γ для будь-якого заданого значення c з тангенсу кута нахилу дотичної до експериментальної ізотерми поверхневого натягу в точці, яка відповідає заданій концентрації. Для цього необхідно побудувати графік залежності величини σ від концентрації c , провести дотичні до отриманої кривої в точках, що відповідають значенням концентрацій (рис. 5.4); з цих же точок опустити перпендикуляри на вісь ординат. На графіку визначте довжину відрізка Z_i , що відсікається на осі ординат дотичною й перпендикуляром (для кожної експериментальної точки з концентрацією розчину ПАР c_i). З рисунка видно, що

$Z_i = -c_i \cdot \left(\frac{d\sigma}{dc} \right)_i$. Після підставлення величини Z_i у рівняння Гіббса можна

розрахувати величини адсорбції за співвідношенням: $\Gamma_i = Z_i / (RT)$. Гіббсівська адсорбція завжди виражається в молях на одиницю площі. Якщо σ виражена в Дж/м², то необхідно прийняти газову сталу $R = 8,3144$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹, щоб привести всі одиниці вимірювань у відповідність.

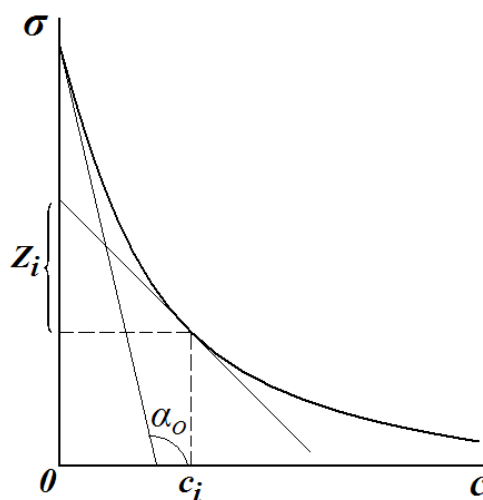


Рисунок 7.4— Ізотерма поверхневого натягу ПАР $\sigma = f(c)$

Для розрахунку a_{∞} використовують рівняння Ленгмюра в лінійній формі:

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{\infty}} + \frac{1}{\Gamma_{\infty} Kc}, \text{ або } \frac{1}{a} = \frac{1}{a_{\infty}} + \frac{1}{a_{\infty} Kc}.$$

Будують графік залежності $1/a$ від $1/c$. Відрізок, який відсікають на вісі ординат при екстраполяції величини $1/a$ на нульову концентрацію, буде дорівнювати величині $1/a_{\infty} = 0,74 \cdot 10^6$, $a_{\infty} = 1,35 \cdot 10^{-6}$. Усі розрахунки зводять до таблиці:

c	$Z \cdot 10^3$	$a \cdot 10^7$	$1/a \cdot 10^{-6}$	$1/c$
0,05	0,8	3,28	3,045	20
0,1	1,1	4,51	2,22	10
0,2	1,5	6,15	1,62	5
0,3	2,0	8,21	1,22	3,3
0,4	2,8	10,0	1,0	2,5

Тангенс кута нахилу прямої дорівнюватиме $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{a_{\infty} K}$. Звідси знаходять величину K :

$$K = \frac{1}{a_{\infty} \operatorname{tg} \alpha} = \frac{1}{1,35 \cdot 10^{-6} \cdot 1,45 \cdot 10^5} = 5,1 \text{ дм}^3/\text{моль}.$$

Площу, яку займає молекула ПАР у насиченому поверхневому шарі, розраховують за формулою

$$S_0 = \frac{1}{a_{\infty} N_A} = \frac{0,74 \cdot 10^6}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,23 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2.$$

Товщину адсорбційного шару розраховують за формулою:

$$\delta = \Gamma_{\infty} M/\rho = \frac{1,35 \cdot 10^{-6} \cdot 116 \cdot 10^{-3}}{0,824 \cdot 10^3} = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Приклад 2. Розрахуйте граничну адсорбцію валеріанової кислоти на поверхні розділу «водний розчин – повітря» при 350 К і концентрації розчину 0,001 моль/дм³, якщо залежність поверхневого натягу розчину від концентрації виражають рівнянням: $\sigma = \sigma_0 - 17,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 19,72c)$.

Розв'язання. Залежність поверхневого натягу від концентрації ПАР виражають рівнянням Шишковського:

$$\sigma = \sigma_0 - B \ln(1 + Ac).$$

Рівняння Шишковського можна отримати в результаті спільного розв'язання адсорбційного рівняння Гіббса з рівнянням Ленгмюра. При цьому $B = a_{\infty} RT$ і $A = K$. Тоді маємо:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 - a_{\infty} RT \ln(1 + Kc). \\ a_{\infty} RT &= 17,7 \cdot 10^{-3}. \\ a_{\infty} &= \frac{17,7 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 350} = 6,08 \cdot 10^{-6} \text{ моль/м}^2. \end{aligned}$$

Контрольні задачі

1. Розрахуйте за рівнянням Шишковського ($B = 17,7 \cdot 10^{-3}$; $A = 19,72$) поверхневий натяг водних розчинів валеріанової кислоти наступних концентрацій (кмоль/м³): 0,005; 0,020; 0,040; 0,100 при 353 К. Поверхневий натяг води при 353 К дорівнює $62,6 \cdot 10^{-3}$ Дж/м². Побудуйте ізотерму поверхневого натягу $\sigma = f(c)$.

2. Розрахуйте адсорбцію октанолу на межі водний розчин – повітря при 293 К і $c = 0,25$ моль/м³ за такими даними:

c , моль/м ³	0	0,04	0,10	0,16	0,40	1,00;
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	72,75	70,60	69,00	67,80	64,2	60,60.

3. Знайдіть площу, яку займає одна молекула аніліну в насиченому адсорбційному шарі на поверхні його водного розчину з повітрям, якщо гранична адсорбція аніліну становить $6 \cdot 10^{-6}$ моль/м³. *Відповідь:* $28 \cdot 10^{-20}$ м².

4. Розрахуйте адсорбцію розчину масляної кислоти з концентрацією 0,1 кмоль/м³ на межі «водний розчин – повітря» при 283 К, якщо залежність поверхневого натягу від концентрації виражена рівнянням Шишковського:

$$\sigma = \sigma_0 - 16,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 21,5c). \text{ Відповідь: } 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ моль/м}^2.$$

5. Розрахуйте адсорбцію масляної кислоти на межі «водний розчин – повітря» при 293 К і $c = 0,104$ кмоль/м³ за даними:

c , кмоль/м ³	0,06	0,021	0,50	0,104	0,246;
$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м ²	72,53	68,12	63,53	58,60	50,30.

6. Розрахуйте адсорбцію пропіонової кислоти на межі «водний розчин – повітря» при 273 К і $c = 0,5$ кмоль/м³, якщо константи рівняння Шишковського дорівнюють: $B = 12,5 \cdot 10^{-3}$; $A = 7,73$. *Відповідь:* $3 \cdot 10^{-9}$ кмоль/м²

7. Визначте поверхневу активність валеріанової кислоти на межі «водний розчин – повітря» при 373 К і $c = 0,01$ кмоль/м³ за константами Шишковського: $B = 9,3 \cdot 10^{-3}$; $A = 18,32$. *Відповідь:* 17,04 Дж·м/кмоль.

8. Розрахуйте граничну адсорбцію a_∞ , довжину молекули δ і площу S , яку займає одна молекула валеріанової кислоти C_4H_9COOH у насиченому адсорбційному шарі на поверхні його водного розчину з повітрям при $T = 350$ К і концентрації розчину 0,001 кмоль/м³, якщо константи рівняння Шишковського становлять $B = 17,7 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $A = 19,72$ м³/кмоль, а густина валеріанової кислоти $\rho = 0,942 \cdot 10^3$ кг/м³. *Відповідь:* $6,08 \cdot 10^{-9}$ кмоль/м²; $6,6 \cdot 10^{-10}$ м; $27 \cdot 10^{-20}$ м²;

9. Розрахуйте за рівнянням Ленгмюра адсорбцію пропіонової кислоти з розчину з концентрацією 0,5 моль/дм³ на поверхні розділу «розчин-повітря» при 298 К, якщо поверхневий натяг цього розчину 55,6 мДж/м², поверхневий натяг води 71,96 мДж/м² та константа рівняння Ленгмюра $K = 7,73$ дм³/моль. *Відповідь:* $3,31 \cdot 10^{-6}$ моль/м².

10. Розрахуйте адсорбцію валеріанової кислоти на межі «водний розчин – повітря» при 293 К і $c = 0,0206$ кмоль/м³ за даними:

c , кмоль/м ³	0	0,0103	0,0206	0,0683	0,2049;
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	72,55	65,45	59,78	49,31	35,20.

11. Площа, яку займає одна молекула 1,4-бутандіолу у насиченому адсорбційному моношарі на поверхні його водного розчину, становить $4,69 \cdot 10^{-19}$ м². Розрахуйте величину граничної адсорбції 1,4-бутандіолу на межі розділу рідина – повітря. *Відповідь:* $3,54 \cdot 10^{-6}$ моль/м².

12. Розрахуйте адсорбцію аніліну з водного розчину з концентрацією 0,25 моль/дм³, якщо при +15 °С гранична адсорбція становить $6 \cdot 10^{-6}$ моль/м², поверхневий натяг розчину й води відповідно дорівнюють 61,5 і 73,48 мДж/м². *Відповідь:* $3,39 \cdot 10^{-6}$ моль/м².

13. Розрахуйте константу К рівняння Ленгмюра, що описує адсорбцію аніліну з водного розчину з концентрацією 0,25 моль/дм³, якщо при 288 К гранична адсорбція становить $6 \cdot 10^{-6}$ моль/м², поверхневий натяг розчину й води відповідно дорівнюють 61,5 і 73,48 мДж/м². *Відповідь:* $K = 5,2$ дм³/моль.

14. Розрахуйте адсорбцію гептанолу на основі концентраційної залежності поверхневого натягу його водних розчинів при 293 К:

c , моль/дм ³	0	0,040	0,100	0,200	0,316	0,500	0,794	1,000;
$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м ²	72,7	71,4	70,9	70,0	69,2	68,2	67,2	66,8.

Визначте константу рівняння Ленгмюра. *Відповідь:* $K = 16,4$ дм³/моль.

15. Використовуючи дані попередньої задачі, визначте площу, яку займає одна молекула гептанолу у насиченому адсорбційному шарі. *Відповідь:* $S_0 = 1,2 \cdot 10^{-18}$ м².

16. За даними про адсорбцію пари води на макропористому силікагелі при кімнатній температурі:

$p \cdot 10^{-2}$, Па	3,04	4,68	7,72	11,69	14,03	17,77;
a , моль/кг	3,44	6,28	9,22	11,67	13,22	14,89.

Визначте граничну ємність силікагелю, користуючись рівнянням Ленгмюра. *Відповідь:* 31 моль/кг.

17. При дослідженні адсорбції газоподібного азоту на активованому вугіллі при 194,4 К було отримано наступні дані:

$p \cdot 10^{-3}$, Па	1,86	6,12	17,96	33,65	68,89;
$a \cdot 10^3$, м ³ /кг	5,06	14,27	23,61	32,56	40,83.

Розрахуйте константи рівняння Ленгмюра та питому поверхню активованого вугілля, приймаючи, що густина газоподібного азоту дорівнює 1,25 кг/м³, а площа, яку займає одна молекула азоту на поверхні адсорбенту дорівнює 0,16 нм².

Відповідь: $S_{\text{пит.}} = 2,14 \cdot 10^5$ м²/кг; $a_{\infty} = 0,05$ м³/кг; $K = 6 \cdot 10^5$ Па⁻¹.

18. Розрахуйте за рівнянням Ленгмюра адсорбцію ізоамілового спирту з розчину з концентрацією $0,1 \text{ кмоль/м}^3$ на поверхні розділу розчин-повітря при 292 К , якщо гранична адсорбція становить $8,7 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^2$, а коефіцієнт рівняння Шишковського $A = 42$. *Відповідь:* $7 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^2$.

19. Залежність поверхневого натягу від концентрації водних розчинів валеріанової кислоти при 353 К описується рівнянням Шишковського:

$\sigma = 62,6 \cdot 10^{-3} - 17,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 19,72c)$. Розрахуйте величину адсорбції валеріанової кислоти з водного розчину, концентрація якого дорівнює $0,03 \text{ кмоль/м}^3$. *Відповідь:* $2,24 \cdot 10^{-6} \text{ моль/м}^2$.

20. Розрахуйте поверхневий натяг розчинів масляної кислоти при 273 К для таких концентрацій (кмоль/м^3): $0,007$; $0,021$; $0,050$; $0,104$. Побудуйте ізотеру поверхневого натягу $\sigma = f(c)$. Поверхневий натяг води при 273 К становить $75,49 \text{ н/м}$, константи рівняння Шишковського: $B = 12,6 \cdot 10^{-3} \text{ м/н}$, $A = 21,5 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

21. Розрахуйте адсорбцію гептанової кислоти на межі «водний розчин – повітря» при 293 К і $c = 0,20 \text{ моль/м}^3$ за такими даними:

$c, \text{ моль/м}^3$	0	0,01	0,1	0,251	0,398	0,631;
$\sigma \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	72,75	72,40	71,20	67,00	63,60	60,10.

22. Питома поверхня непористої сажі дорівнює $73,7 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Розрахуйте площу, яку займає молекула бензолу в щільному моношарі, виходячи з даних про адсорбцію бензолу на цьому адсорбенті при 293 К :

$p, \text{ Па}$	1,03	1,29	1,74	2,50	6,67;
$a, \text{ моль/кг}$	1,57	1,94	2,55	3,51	7,58.

Припускається, що ізотерна адсорбції описується рівнянням Ленгмюра. *Відповідь:* $0,49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

23. Розрахуйте адсорбцію гексанолу на межі «водний розчин – повітря» при 293 К і $c = 2,5 \text{ моль/м}^3$ за такими даними:

$c, \text{ моль/м}^3$	0	0,20	0,63	1,26	3,98	6,31;
$\sigma \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	72,75	70,80	69,40	66,90	60,50	55,40.

24. Розрахуйте поверхневий натяг розчину валеріанової кислоти з концентрацією $0,005 \text{ кмоль/м}^3$ при 353 К . Коефіцієнти в рівнянні Шишковського: $B = 17,7 \cdot 10^{-3}$; $A = 19,72$. Поверхневий натяг води при 353 К дорівнює $62,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$. *Відповідь:* $60,9 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$.

25. Активна поверхня активованого деревного вугілля досягає 1000 м^2 на 1 г вугілля. Розрахуйте, яку кількість фосгену (COCl_2) в мг може поглинути поверхня 10 м^2 вугілля, якщо 1 г вугілля адсорбує 440 см^3 газу (за нормальних умов). *Відповідь:* $19,44 \text{ мг}$.

26. У процесі адсорбції стеаринової кислоти з розчину в бензолі на колоїдному нікелі одержано наступні дані:

$\Gamma \cdot 10^5, \text{ моль/г}$	2,0	3,6	4,0	4,3	4,4	4,7;
$c \cdot 10^3, \text{ моль/л}$	0,2	2,0	3,8	5,0	5,2	8,1.

Розрахуйте константи рівняння Ленгмюра a_{∞} і K , використовуючи графічний метод. Визначте питому поверхню адсорбенту, якщо площа, яку займає одна молекула стеаринової кислоти у насиченому адсорбційному шарі $S_0 = 25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

27. Активна поверхня 1 г силікагелю становить 465 м^2 . Розрахуйте, яка кількість молекул бромуглецю поглинається 1 см^2 поверхні адсорбенту у процесі адсорбції на 10 г силікагелю 5 мг бромуглецю. *Відповідь:* $4 \cdot 10^{11}$ молекул.

28. На поверхню води було нанесено 0,0061 г розчину олеїнової кислоти $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ у бензолі. Після випаровування бензолу олеїнова кислота рівномірно розподілилася по поверхні води. Площина мономолекулярного шару кислоти становить 361 см^2 . Визначте поперечний перетин молекули олеїнової кислоти. *Відповідь:* $2,97 \cdot 10^{-9} \text{ см}$.

29. За якої концентрації поверхневий натяг водного розчину валеріанової кислоти буде дорівнювати $52,2 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$, якщо поверхневий натяг води при 273 К дорівнює $75,49 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$? Константи рівняння Шишковського для водного розчину валеріанової кислоти при 273 К: $B = 14,72 \cdot 10^{-3}$; $A = 10,4$.

Відповідь: $0,37 \text{ кмоль/м}^3$.

8 ІОНООБМІННА АДСОРБЦІЯ. ІОНІТИ, ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ, СПОСОБИ ОТРИМАННЯ, ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ. ОБМІННА ЄМНІСТЬ ІОНІТІВ. ВИКОРИСТАННЯ ІОНООБМІННОГО МЕТОДУ ДЛЯ ПОМ'ЯКШЕННЯ І ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ВОДИ

Іонообмінна адсорбція дуже поширена у природі, а також у різних галузях промисловості: очистка питної води, технічних вод промислового призначення, пом'якшення та демінералізація води, очистка харчових продуктів від радіонуклідів, йонів важких металів, інших шкідливих домішок і та ін.

Речовини, які проявляють здатність до іонного обміну і використовуються для адсорбції йонів, одержали назву *іонообмінників* або *іонітів*.

Іоніти мають структуру у вигляді каркасу, який «зшитий» звичайними ковалентними зв'язками. Каркас (матриця) має позитивний або негативний заряд, який скомпенсований протиіонами, що знаходяться в адсорбційному і дифузному шарах ПЕШ.

Іоніти класифікують за походженням – на природні і синтетичні; за складом – на неорганічні і органічні; за знаком заряду йонів, які обмінюються – на катіоніти, аніоніти і амфоліти (можуть обмінюватися в залежності від умов, як катіонами, так і аніонами).

До природних неорганічних іонітів відносяться силікати типу цеолітів – шабазит, глауконіт ($\text{Me}_{2n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (Me – катіон лужного або лужноземельного металу)). Їх каркас представляє собою правильну сітчасту структуру алюмосилікату, в порах якого розміщуються йони лужних і лужно-земельних металів, які виступають у ролі протиіонів. Деякі мінерали, наприклад, апатит, здібні до обміну аніонів.

Природними іонітами органічного походження являються, наприклад, гумусові речовини, целюлоза, деревина, торф. Природні іоніти не знайшли широкого технічного використання, тому що вони хімічно нестійкі, не мають достатньої механічної міцності.

Першими синтетичними іонітами були плавлені і гелеподібні пермутити-алюмосилікати, подібні цеолітам ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Гелеподібні пермутити порівняно довго використовували для пом'якшення води. До них відносяться: силікагель, Al_2O_3 , сульфовугілля.

З неорганічних синтетичних аніонітів, які мають практичне значення, можна назвати гідроксиди заліза і алюмінію. Для спеціальних цілей використовують гідроксиди цирконію, хрому, олова, свинцю і та ін. Усі неорганічні іоніти руйнуються кислотами і лугами.

Широкого розповсюдження набули синтетичні іоніти (іонообмінні смоли). Ці речовини складаються з жорсткої високомолекулярної матриці (каркаса, сітки, скелета), яка включає фіксовані іони одного знаку і рухомі протиіони, які компенсують своїми зарядами заряд каркаса і стехіометрично обмінюються на йони розчину.

Іонообмінні смоли – синтетичні органічні іоніти. Це тверді, нерозчинні, обмежено набухаючі в розчинах електролітів і органічних розчинниках, зшиті полімери, здібні до електролітичної дисоціації.

Матриця іонообмінної смоли – сітчастий полімер, в якому закріплені іоногенні групи (SO_3H , COOH , PO_3H_2 , $\text{N}^+(\text{CH}_3)_2$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$, N^+R_3 , NH_2), що несуть електричний заряд, який урівноважується протилежним по знаку зарядом рухомих йонів (протиіонів). Іонообмінні смоли одержують двома методами: поліконденсацією або полімеризацією. В обох методах процес синтезу складається з трьох стадій: 1) одержання лінійних полімерів; 2) утворення сітчастої структури з окремих лінійних полімерів за допомогою місткоутворювачів; 3) введення в макромолекули активних (іоногенних) груп. На рисунку 5.5. зображена матриця іонообмінної смоли.

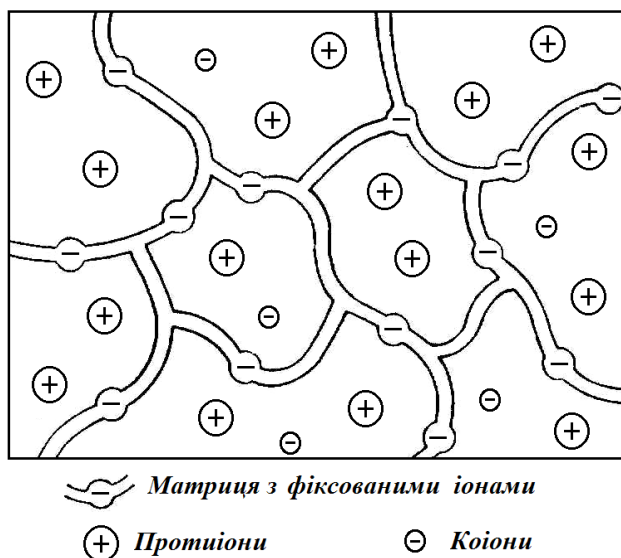


Рисунок 8.1 – Модель матриці поліелектроліту (катіоніту) з фіксованими аніонами та рухомими катіонами

У процесі контакту сульфокатіоніта в H^+ -формі з розчином $NaCl$ перебігає реакція обміну йонів Гідрогену на йони Натрію:



де R – матриця;

$SO_3^- H^+$ – іоногенна група;

H^+ – рухливий йон (протиіон іоніту), здатний до іонного обміну;

Cl^- – коіони.

Основними властивостями іонітів, які визначають їх якість як сорбентів, являються: ємність, кислотно-основні властивості, селективність, набухання, хімічна стійкість, механічна міцність.

Під ємністю розуміють здібність іоніту обмінювати протиіони. Ємність визначають числом іоногенних груп в іоніті і тому теоретично являється сталою величиною. Але на практиці ємність іоніту залежить від умов проведення адсорбції, а також від властивостей і розмірів адсорбованих іонів.

Обмінну ємність іонітів визначають в молях або мілімолях іонів, які витягнуті з розчину, в розрахунку на одиницю маси сухого іоніту. Розрізняють статичну ($CO\epsilon$) і динамічну ($DO\epsilon$) обмінні ємності.

Статична – повна ємність, характеризується загальним числом іоногенних груп в молях на одиницю маси сухої сировини або на одиницю об'єму набухлого іоніту.

Динамічна обмінна ємність, або робоча обмінна ємність, відноситься тільки до тієї частини іоногенних груп, яку використовують в технологічних умовах, наприклад, в іонообмінній колонці при відносному русі іоніту і розчину. Вона залежить від швидкості руху, розмірів колонки та інших факторів і завжди менша статичної обмінної ємності.

Для визначення статичної обмінної ємності іонітів застосовують різні методи. Їх зазвичай стандартизують. Всі ці методи зводяться до насичення іоніту яким-небудь іоном, потім витісненням його іншим іоном і аналізом першого в розчині. Наприклад, катіоніти зручно повністю перевести в H^+ -форму, а потім промити його розчином хлориду натрію. Отриманий кислий розчин титрують розчином лугу. Ємність у цьому випадку дорівнює відношенню кількості кислоти в розчині до наважки іоніту:

$$CO\epsilon = \frac{c_{\text{лугу}} \cdot V_{\text{лугу}}}{m} \text{ (ммоль/г)},$$

де $c_{\text{лугу}}$ – молярна концентрація лугу, моль/дм³;

$V_{\text{лугу}}$ – об'єм розчину лугу, см³;

m – маса іоніту, г.

Проводять і пряме титрування іонітів. Отримують криві титрування сильних і слабких кислот.

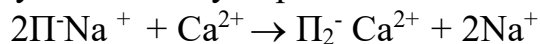
Швидкість іонного обміну в значній мірі визначається швидкістю процесу дифузії іона до поверхні іоніта. Характерною властивістю іонітів є набухання при контакті сухого іоніту з розчином, особливо дуже набухають синтетичні іонообмінні смоли. Важливою характеристикою іонітів являється їх

хімічна стійкість і механічна міцність. Хімічна стійкість – стійкість по відношенню до кислот, лугів, окиснювачів, під дією яких може руйнуватися структура іоніту. Хімічна стійкість оцінюється в утраті обмінної ємності.

Пом'якшення та демінералізація води

Важною сферою використання іонітів являється пом'якшення і опріснення води.

У цьому методі іонообмінну смолу (катіоніти), яку випускають в промисловості у вигляді зерен, переводять у натрієву форму, заповнюють колонку, через яку пропускають воду. Процес іде за схемою:

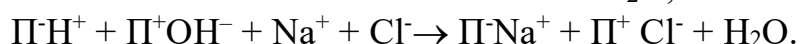
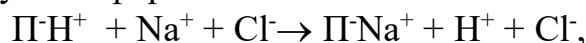


П– іоногенна група поглинача.

Іони Ca^{2+} і Mg^{2+} замінюються на іони Na^+ . Аналогічно звільнюються від різних аніонів, замінюючи їх на хлорид-іон методом попускання води через аніоніт, який переведений в Cl^- -форму.

Дуже важливою є задача часткового або повного опріснення води (видалення солей).

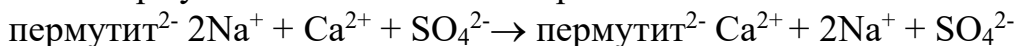
Для цього воду послідовно пропускають через катіоніт у H^+ -формі, а потім – через аніоніт у OH^- -формі:



Іоніти після використання їх ємності можуть бути легко регенеровані обробкою кислотою або лугом.

Промислові іоніти володіють високою механічною і хімічною стійкістю і витримують практично сотні регенеруючих циклів.

Для пом'якшення (але не демінералізації) води може бути використаний алюмосилікат пермутит – синтетичний неорганічний іонообмінник:



Замість пермутиту можливе використання глауконіта – більш дешевого природного мінералу.

Подібні схеми використовуються для рішення однієї з важливіших проблем сучасності – очистки заводських стічних вод, в яких більшість шкідливих речовин містяться в іонних формах (йони важких металів, органічні основи і таке інше).

Необхідно також нагадати про використання іонного обміну в сучасній медицині: при захворюваннях, які характеризуються порушенням іонного балансу в органах і тканинах. Введенням високодиспергованих порошків з іонообмінних смол вдається зсунути в потрібний бік і так підтримувати необхідний іонний баланс організму.

До використання іонного обміну відносяться іонообмінна хроматографія, а також іонообмінні електроди, які складаються з іоніту і розчину. Потенціал на межі розподілу фаз виникає за рахунок іонообмінного процесу, в результаті якого поверхня іоніту і розчину отримують електричні заряди протилежного знаку.

Приклад 1. Розрахуйте обмінну ємність катіоніту марки КУ-2, якщо через адсорбційну колонку, яка містить 100 г цього іоніту, пропустили 25 дм³ води із загальною твердістю 13,6 ммоль/дм³.

Розв'язання. Повну обмінну ємність катіоніту (ПОЄ) визначають максимальною кількістю йонів (в ммоль/г або ммоль/дм³), що поглинаються 1 г катіоніту в процесі іонного обміну:

$$ПОЄ = \frac{TV}{m}, \text{ ммоль/г,}$$

де T – твердість води, ммоль/дм³;

V – об'єм води, см³;

m – маса іоніту, г.

$$ПОЄ = \frac{13,6 \cdot 25}{100} = 3,4 \text{ ммоль/г.}$$

Приклад 2. Повна обмінна ємність аніоніту АВ-17-8 у Cl⁻-формі дорівнює 4,2 моль/кг. Визначте гранично можливу кількість (в г) йонів Ауруму (III), яка може бути сорбована 1 кг іоніту з розчинів хлоридної кислоти, якщо у розчині вказаний елемент знаходиться у вигляді комплексного аніону [AuCl₄]⁻.

Розв'язання. 1 кг іоніту може сорбувати 4,2 моль Au³⁺. Звідси $m(\text{Au}^{3+}) = v \cdot Ar = 4,2 \cdot 196,96 = 827,23 \text{ г.}$

Контрольні задачі

1. До 200 см³ 0,12 М розчину NaOH додали 5 г повітряно-сухого сильнокислотного катіону в H⁺-формі. Після встановлення рівноваги відфільтрували 100 см³ розчину, для нейтралізації якого було витрачено 20 см³ 0,12 М розчину HCl. Визначте повну обмінну ємність катіоніту.

Відповідь: 3,84 моль/кг.

2. До 150 см³ розчину H₂SO₄ з концентрацією 0,11 моль/дм³ ввели 3 г сильноосновного аніоніту в OH⁻-формі. Після встановлення рівноваги іонного обміну відібрали 50 мл розчину, для нейтралізації якого було витрачено 22 см³ розчину KOH з концентрацією 0,05 моль/дм³. Розрахуйте повну обмінну ємність аніоніту. **Відповідь:** 9,9 моль/кг.

3. Повна обмінна ємність сухого сульфокатіоніту КУ-2-8 у Na⁺-формі дорівнює 4,8 моль/кг. Визначте максимальну кількість (в г) йонів Кобальту (II) і Барію, яка може бути сорбована з відповідних розчинів 1 кг іоніту.

Відповідь: $m(\text{Co}^{2+}) = 141,4 \text{ г; } m(\text{Ba}^{2+}) = 329,6 \text{ г.}$

4. Повна обмінна ємність сухого сульфокатіоніту в Na⁺-формі дорівнює 5,2 моль/кг. Визначте максимальну кількість (в г) йонів Барію, яка може бути сорбована з відповідного розчину одним кілограмом іоніту.

Відповідь: $m(\text{Ba}^{2+}) = 357 \text{ г.}$

5. Повна обмінна ємність аніоніту АВ-17-8 у Cl⁻-формі дорівнює 4,2 моль/кг. Визначте гранично можливу кількість (в г) йонів Кобальту (II), яка може бути сорбована 1 кг іоніту з розчинів хлоридної кислоти, якщо у розчині вказаний елемент знаходиться у вигляді комплексного аніону [CoCl₄]²⁻.

Відповідь: $m(\text{Co}^{2+}) = 123,76 \text{ г.}$

6. Розрахуйте кількість сульфокатіоніту у H^+ -формі і аніоніту в OH^- -формі, що необхідні для очищення 1000 м^3 природної води (без регенерації), яка містить $0,025 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl}$, $0,04 \text{ г/дм}^3 \text{ MgSO}_4$ та $0,12 \text{ г/дм}^3 \text{ Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Повна обмінна ємність катіоніту – $4,2 \text{ моль/кг}$, аніоніту – $3,5 \text{ моль/кг}$.

Відповідь: 613 кг катіоніту; 735 кг аніоніту.

7. Повна обмінна ємність сухого сульфокатіоніту в Na^+ -формі дорівнює $5,0 \text{ моль/кг}$. Визначте гранично можливу кількість (в г) заліза (III), яка може бути сорбована 1 кг іоніту з відповідного розчину.

Відповідь: $m(\text{Fe}^{3+}) = 93,07 \text{ г}$.

8. Розрахуйте кількість катіоніту КУ-2, що необхідна для пом'якшення 2 м^3 води, яка містить $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ моль/м}^3$ солей твердості. Повна обмінна ємність катіоніту дорівнює $3,8 \text{ моль/кг}$. *Відповідь:* $0,0029 \text{ кг}$.

9. Розрахуйте повну обмінну ємність іоніту, якщо після збовтування $0,5 \text{ г}$ іоніту з насиченим розчином NaCl на титрування цього розчину було витрачено 20 см^3 розчину NaOH концентрації $0,1 \text{ моль/дм}^3$. *Відповідь:* 4 моль/кг .

10. Розрахуйте повну обмінну ємність катіоніту, який використовують для пом'якшення 10 дм^3 води, твердість якої становить $3,8 \text{ ммоль/дм}^3$. Об'єм катіоніту в набухлому стані дорівнює 76 см^3 . *Відповідь:* $0,5 \text{ моль/дм}^3$.

11. Розрахуйте твердість води, яка обумовлена присутністю солей магнію, якщо на пом'якшення 3 дм^3 води використано 3 г катіоніту, повна обмінна ємність якого становить $3,2 \text{ ммоль/г}$. *Відповідь:* $3,2 \text{ ммоль/дм}^3$.

12. Твердість води обумовлена наявністю солей кальцію. Розрахуйте кількість кальцію (мг) в 1 дм^3 води, якщо для пом'якшення 10 дм^3 води потрібно 50 г сухого катіоніту, обмінна ємність якого становить 4 ммоль/г .

Відповідь: 400 мг .

13. Розрахуйте обмінну ємність іоніту, якщо крізь адсорбційну колонку, яка містить 50 г іоніту, пропущено $11,35 \text{ дм}^3$ води, загальна твердість якої дорівнює $8,5 \text{ ммоль/дм}^3$. *Відповідь:* $1,93 \text{ моль/кг}$.

14. Визначте, яку кількість морської води (в кг) можна знесолити без регенерації за допомогою хроматографічних колонок, які містять 1 кг катіоніту і 1 кг аніоніту, якщо динамічна обмінна ємність кожного іоніту дорівнює $3,5 \text{ моль/кг}$. Концентрація солей, що знаходяться у переважаючій кількості у воді, становить (мас. %): $\text{NaCl} - 2,74$; $\text{MgCl}_2 - 0,33$; $\text{MgSO}_4 - 0,23$.

Відповідь: $6,08 \text{ кг}$.

15. Обмінна ємність каолінової глини становить $13,5 \text{ ммоль/г}$. Який об'єм води із загальною твердістю $3,5 \text{ ммоль/дм}^3$ можна профільтрувати крізь 150 г глини для повного вилучення катіонів Ca^{2+} і Mg^{2+} ? *Відповідь:* $578,6 \text{ дм}^3$.

16. Обмінна ємність катіоніта-пермутиту $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ дорівнює $7,2 \text{ ммоль/г}$. Яке значення має усунена твердість води, якщо через 200 г цього катіоніта пропущено 50 дм^3 води? *Відповідь:* $28,8 \text{ ммоль/дм}^3$.

**9 ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ.
БУДОВА ПОДВІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ШАРУ. КОАГУЛЯЦІЯ,
ФАКТОРИ, ЩО ЇЇ СПРИЧИНЯЮТЬ.
ТЕОРІЯ СТІЙКОСТІ І КОАГУЛЯЦІЇ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ.
УМОВИ КОАГУЛЯЦІЇ ЛІОФОБНИХ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ.**

Стійкість ліофобних дисперсних систем

Під стійкістю дисперсних систем розуміють сталість у часі її стану та основних властивостей: дисперсності, рівномірного розподілу частинок дисперсної фази в об'ємі дисперсійного середовища та характеру взаємодії між частинками.

Питання стійкості дисперсних систем займають центральне місце в колоїдній хімії, оскільки ліофобні дисперсні системи (золі, суспензії, емульсії), які мають велику поверхню розподілу фаз, агрегативно нестійкі.

Песков М. П. ввів поняття про два види стійкості дисперсних систем: седиментаційну (кінетичну) та агрегативну.

Седиментаційна стійкість дозволяє системі зберегти рівномірний розподіл частинок в об'ємі, тобто протистояти дії сили тяжіння і процесам осідання та спливання частинок.

Агрегативна стійкість дисперсних систем – це здатність протистояти агрегації частинок.

За цими ознаками дисперсні системи поділяють на два класи:

1) термодинамічно стійкі (або ліофільні колоїди), які самочинно диспергуються та існують без додаткової стабілізації (міцелярні розчини ПАВ, розчини ВМС та ін). При утворенні цих систем зміна енергії Гіббса негативна ($\Delta G < 0$).

2) термодинамічно нестійкі (або ліофобні) системи (золі, суспензії, емульсії, піни). Для них $\Delta G > 0$.

Типовими ліофобними колоїдами являються золі металів, сульфідів, галогенідів, оксидів та ін., а також золі неметалів: Au, Ag, ZnS, As₂S₃, AgI, SiO₂, TiO₂, Al(OH)₃, Fe(OH)₃, S, Se та інші.

Агрегативна стійкість характеризує здатність колоїдних систем зберігати ступінь дисперсності внаслідок наявності у частинок електричного заряду. Цей заряд перешкоджає злипанню колоїдних частинок та сприяє утворенню сольватної оболонки в розчинах навколо частинок.

Агрегативна стійкість дисперсних систем досить різна. Одні системи можуть існувати секунди після їх утворення, інші – дуже довгочасні.

Найбільш нестійкими за своєю природою являються ліофобні колоїдні системи, для яких характерна слабка взаємодія між частинками дисперсної фази та дисперсійного середовища. Для надання стабільності ліофобним системам необхідна присутність тих чи інших факторів стійкості, які підрозділяють на термодинамічні та кінетичні.

Агрегативна та седиментаційна стійкості вискодисперсних систем тісно пов'язані між собою.

Утрата агрегативної стійкості виражається в укрупненні частинок шляхом *коагуляції*, тобто злипанні частинок між собою з утворенням більш крупних агрегатів. Coagulatio (лат.) – згортання, згущення. При цьому питома площа поверхні, а разом з нею і надлишкова поверхнева енергія знижуються.

Якщо дисперсна фаза складається з крапельок рідини або бульбочок, то процес їх злиття називають коалесценцією (coalesco – зростаюсь, об'єднуюсь).

При коагуляції змінюються фізико-хімічні властивості систем: з'являється мутність, випадає осад, знижується осмотичний тиск, змінюється електропровідність і та ін.

Коагуляція золів може бути викликана різними факторами: зміною температури, механічною дією (інтенсивне перемішування, струшування, перекачування по трубам), дією світла та різного роду випромінювань, дією електричних розрядів та ін.

Однак найбільш важливий фактор, що викликає коагуляцію, – це дія електролітів. Експериментально встановлені закономірності при коагуляції електролітами відомі під назвою *правил коагуляції*:

1. Коагуляцію викликають будь-які електроліти, але з помітною швидкістю вона починається лише при досяганні певної концентрації; мінімальна концентрація електроліту, при перевищенні якої спостерігається коагуляція, називається *порогом коагуляції* (γ). Його виражають в ммоль/л.

Поріг коагуляції залежить як від природи електроліту, так і від валентності коагулюючого іона. Поріг коагуляції обчислюють за формулою:

$$\gamma = \frac{C_{ел} \cdot V_{ел}}{V_3 + V_{ел}} \cdot 1000 \text{ ммоль/дм}^3,$$

де $C_{ел}$ – молярна концентрація електроліту, моль/дм³;

V_3 – об'єм золю, см³;

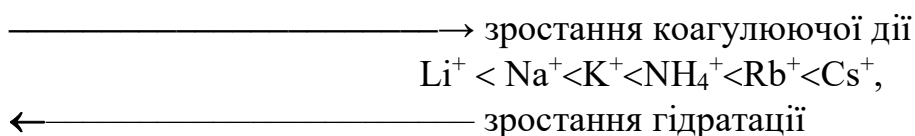
$V_{ел}$ – найменший об'єм розчину електроліту, що достатній для коагуляції золю, см³.

2. Коагулююча дія властива тому йону електроліту, заряд якого протилежний заряду колоїдної частинки (гранули), причому його коагулююча дія тим сильніша, чим вище його заряд; цю закономірність називають правилом Шульце-Гарді (правило значності).

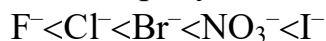
З правила Шульце-Гарді випливає, що пороги коагуляції одно-, двох- і трьохзарядними йонами $\gamma^I, \gamma^{II}, \gamma^{III}$ незалежно від природи частинок дисперсних фаз пов'язані як: $\gamma^I : \gamma^{II} : \gamma^{III} = 730 : 11 : 1$.

3. В ряду неорганічних йонів з однаковим зарядом коагулююча дія (γ^I) зростає з підвищенням радіусу йона (зменшується здібність до гідратації, а тому зменшується радіус гідратованого йона). Коагулююча дія йона тим сильніша, чим слабкіше він гідратований.

Наприклад, для золів з негативно зарядженою гранулою:



а для золів з позитивно зарядженими гранулами:



Подібні ряди (ліотропні ряди, ряди Гофмейстера) уже наводились в іонообмінній адсорбції.

4. У ряду органічних йонів коагулююча дія (γ^{-1}) зростає з підвищенням адсорбційної здатності.

5. В осадах, які одержують при електролітній коагуляції, завжди присутні йони, які її викликають.

Необхідно мати на увазі, що величина порога коагуляції залежить від ряду умов, які необхідно вказувати при його визначенні: від моменту фіксування ознак коагуляції після внесення електроліту; методу спостереження; від концентрації золю, що досліджується та ін.

Співвідношення порогів концентраційної коагуляції для іонів різних зарядів теоретично було знайдено Б. В. Дерягіним і Л. Д. Ландау і названо *законом шостого ступеня* або *правилом Дерягіна – Ландау*:

$$\gamma = \frac{const}{z^6}.$$

Це означає, що пороги коагуляції одно-, двох- і трьохзарядними іонами $\gamma^I, \gamma^{II}, \gamma^{III}$ незалежно від природи частинок дисперсних фаз пов'язані як:

$$\gamma^I : \gamma^{II} : \gamma^{III} = 730 : 11 : 1.$$

Приклад 1. Пороги коагуляції золю $Fe(OH)_3$ для електролітів калій йодиду та калій біхромату відповідно дорівнюють 10,0 і 0,195 ммоль/дм³ золю. У скільки разів коагулююча здатність калій біхромату більша, ніж для калій йодиду?

Розв'язання. Коагулююча здатність електролітів – це величина, обернена їх порогам коагуляції. Розрахуємо ці величини:

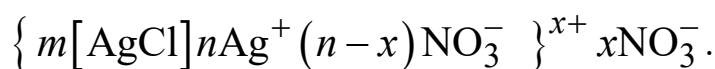
$$\gamma_{KI}^{-1} = \frac{1}{10} = 0,1, \quad \gamma_{K_2Cr_2O_7}^{-1} = \frac{1}{0,195} = 5,1;$$
$$\gamma_{KI}^{-1} : \gamma_{K_2Cr_2O_7}^{-1} = 0,1 : 5,1 = 1 : 51.$$

Для золю $Fe(OH)_3$ коагулююча здатність калій біхромату більша, ніж для калій йодиду у 51 раз.

Приклад 2. Золь аргентум хлориду одержаний змішуванням рівних об'ємів 0,0095 М розчину калій хлориду та 0,012 М розчину аргентум нітрату.

Який з електролітів: $K_3[Fe(CN)_6]$, $K_4[Fe(CN)_6]$, $MgSO_4$ матиме найбільший поріг коагуляції для даного золю?

Розв'язання. За умовою задачі в надлишку аргентум нітрату і тоді формула міцели золю матиме вигляд:



Згідно з правилами коагуляції для даного золю, іонами-коагуляторами будуть аніони і найбільший поріг коагуляції матиме сульфат магнію, бо заряд сульфат-іону найменший.

Приклад 3. Золь аргентум йодиду одержаний змішуванням рівних об'ємів розчинів калій йодиду і аргентум нітрату. Пороги коагуляції для різних електролітів для даного золю мають наступні значення: $\Upsilon_{\text{Na}_3\text{PO}_4} = 0,6$; $\Upsilon_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 20$; $\Upsilon_{\text{AlCl}_3} = 330$. Який з електролітів: KI або AgNO_3 взято в більший концентрації для приготування золю?

Розв'язання. Згідно з правилами коагуляції для даного золю іонами коагуляторами будуть аніони, бо пороги коагуляції зменшуються з ростом заряду аніону. Тому гранула буде заряджена позитивно. А це буде лише тоді, коли AgNO_3 було взято в більший концентрації.

Контрольні задачі

1. Для гідрозолю $\text{Fe}(\text{OH})_3$ коагулюючими йонами є аніони. Пороги коагуляції солей з однозарядними аніонами близькі між собою і складають у середньому $10,69 \text{ ммоль/дм}^3$. Солі двозарядних аніонів мають також близькі між собою пороги коагуляції $0,200 \text{ ммоль/дм}^3$ золю. У скільки разів коагулююча здатність двозарядних аніонів більша, ніж однозарядних?

Відповідь: У 53,7 разів більше.

2. Значення порогів коагуляції деякого гідрозолю різними електролітами становлять: $\text{LiCl} - 58 \text{ ммоль/дм}^3$, $\text{K}_2\text{SO}_4 - 33 \text{ ммоль/дм}^3$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - 0,0425 \text{ ммоль/дм}^3$. Який знак заряду гранули? Відповідь підтвердити розрахунками.

3. Золь аргентум йодиду був отриманий змішуванням рівних об'ємів розчинів калій йодиду та аргентум нітрату. Значення порогів коагуляції для даного гідрозолю різними електролітами становлять в (ммоль/л): $\text{NaCl} - 300$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 315$, $\text{MgCl}_2 - 320$, $\text{Na}_3\text{PO}_4 - 0,6$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 20$, $\text{AlCl}_3 - 330$. Який з електролітів KI чи AgNO_3 взято з більшою концентрацією для приготування золю? Відповідь підтвердити розрахунками. **Відповідь:** AgNO_3 .

4. Коагуляція золю As_2S_3 викликається катіонами. Пороги коагуляції для електролітів KNO_3 , MgCl_2 і AlCl_3 відповідно дорівнюють: 50,0; 0,72; 0,093 ммоль/дм³ золю. Як відносяться між собою коагулюючі здібності катіонів різного заряду? **Відповідь:** 1:69,5:537,5.

5. При дослідженні коагуляції колоїдного розчину аргентум йодиду одержані такі величини порогів коагуляції:

електроліт	KNO_3	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$;
поріг коагуляції, моль/м ³	260,0	6,0	0,07.

Визначте знак заряду часток золю.

6. На коагуляцію $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ золю витратили $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ розчину Na_2SO_4 з молярною концентрацією еквівалента $0,1 \text{ кмоль/м}^3$. Розрахуйте поріг коагуляції золю по Na_2SO_4 . **Відповідь:** $1,67 \cdot 10^{-2} \text{ кмоль/м}^3$.

7. Який об'єм $0.0002 \text{ M Fe(NO}_3)_3$ потрібний для коагуляції $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ золю, якщо поріг коагуляції $c_{\text{Fe(NO}_3)_3} = 0,067 \text{ моль/м}^3$. *Відповідь:* $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

8. На коагуляцію $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ золю Fe(OH)_3 витрачено:

електроліт	NH_4Cl	Na_2SO_4	Na_3PO_4 ;
об'єм, м^3	$1 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$;
молярна концентрація еквівалента, кмоль/м^3	1	0,01	0,0037.

Розрахуйте поріг коагуляції для кожного електроліту і визначте знак заряду частинок золю. *Відповідь:* 90,9; 3,86; 0,999 моль/м^3 .

9. Золь купрум гідроксиду отримали при взаємодії $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ розчину NaOH з молярною концентрацією $0,05 \text{ кмоль/м}^3$ з $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ розчину $\text{Cu(NO}_3)_2$ із молярною концентрацією еквівалента $1 \cdot 10^{-6} \text{ кмоль/м}^3$. Для якого з електролітів – KBr , $\text{Ba(NO}_3)_2$, K_2CrO_4 , MgSO_4 , AlCl_3 поріг коагуляції буде найменшим?

10. Золь кадмій(II) сульфід був отриманий змішуванням рівних об'ємів розчинів Na_2S і $\text{Cd(NO}_3)_2$. Пороги коагуляції для різних електролітів мають значення (кмоль/м^3): $c_{\text{Ca(NO}_3)_2} = 265$; $c_{\text{NaCl}} = 250$; $c_{\text{MgCl}_2} = 290$; $c_{\text{Na}_3\text{PO}_4} = 0,4$; $c_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 15$; $c_{\text{AlCl}_3} = 300$, який з електролітів Na_2S чи $\text{Cd(NO}_3)_2$ було взято у надлишку?

11. Поріг коагуляції розчином AlCl_3 для золю арсен оксиду дорівнює $0,093 \text{ моль/м}^3$, яка концентрація AlCl_3 має бути у розчині, щоб $8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$ його було достатньо для коагуляції $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ золю? *Відповідь:* $0,014 \text{ кмоль/м}^3$.

12. Яким з наведених електролітів NH_4Cl чи $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ більш економно коагулювати золь алюміній гідроксиду: $\{m[\text{Al(OH)}_3]_n\text{Al}^{3+} 3(n-x)\text{Cl}^-\}^{3x+} 3x\text{Cl}^-$.

Розрахуйте поріг коагуляції за NH_4Cl , якщо на коагуляцію часток з 30 м^3 цього золю витрачають $0,33 \text{ м}^3$ 20 % розчину NH_4Cl (густина $\rho = 1060 \text{ кг/м}^3$). *Відповідь:* $43,6 \text{ моль/м}^3$.

13. На 100 м^3 стічної води для коагуляції золю As_2S_3 витрачають 1 м^3 25 % розчину NaCl ($\rho = 1190 \text{ кг/м}^3$). Розрахуйте поріг коагуляції цього золю по NaCl . *Відповідь:* $50,4 \text{ моль/м}^3$.

14. Відпрацьовані розчини виробництва фотоматеріалів містять колоїдне срібло у вигляді галогенідів. Розрахуйте витрати $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ на 100 м^3 стічної води, припускаючи, що знак електричних зарядів колоїдних частинок позитивний. Поріг коагуляції (моль/м^3) для одновалентних йонів дорівнює 142; для двовалентних – 2,43; для тривалентних – 0,068. *Відповідь:* 27,7 кг .

15. Поріг коагуляції розчину KNO_3 для золю Fe(OH)_3 , з позитивно зарядженими частинками дорівнює $60,0 \text{ моль/м}^3$. За допомогою правил Шульце – Гарді і Дерюгіна – Ландау розрахуйте поріг коагуляції $\text{K}_3[\text{Fe(CN)}_4]$ для цього золю. *Відповідь:* $0,082 \text{ моль/м}^3$.

16. Золь ферум(III) гідроксиду, що одержаний неповним гідролізом хлорного заліза, коагулюють розчинами натрій сульфід, натрій хлориду і барій хлориду. Який з електролітів окаже найбільш значну коагулюючу дію?

17. Поріг коагуляції гідрозолу As_2S_3 з негативно зарядженими частинками за KCl дорівнює $4,9 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³. За допомогою правил Шульце – Гарді і Дерягина – Ландау для цього золь розрахуйте пороги коагуляції, що спричинена такими електролітами: K_2SO_4 , MgCl_2 , MgSO_4 , AlCl_3 і $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

18. Поріг коагуляції гідрозолу $\text{Fe}(\text{OH})_3$ з позитивно зарядженими частинками за NaCl дорівнює 9,25 ммоль/дм³. За допомогою правил Шульце – Гарді і Дерягина – Ландау для цього золь розрахуйте пороги коагуляції, що спричинена наступними електролітами: KNO_3 , BaCl_2 , K_2SO_4 , MgSO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

19. Поріг коагуляції гідрозолу металевого золота, яку викликав NaCl , дорівнює 24 ммоль/дм³, а K_2SO_4 – 11,5 ммоль/дм³. Використовуючи правила Шульце – Гарді і Дерягина – Ландау, визначте знак заряду частинок і розрахуйте поріг коагуляції для, наступних електролітів: CaCl_2 , MgSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, AlCl_3 , $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$.

20. При досить повільному введенні речовини В у розбавлений розчин речовини А можливе утворення гідрозолу речовини С (табл. 9.1). Напишіть формулу міцели і вкажіть знак електричного заряду колоїдних частинок цього золь. Яка із запропонованих речовин є найбільш економічним коагулянтom цього золь?

Таблиця 9.1

Варіант	А	В	С	Коагулянт
1	2	3	4	5
1	MgCl_2	NaOH	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	KCl , $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, AlCl_3
2	NH_4CNS	AgNO_3	AgCNS	KNO_3 , CH_3OONa , Na_2SO_4
3	CaCl_2	H_2SO_4	CaSO_4	ZnCl_2 , AlCl_3 , CH_3COONa
4	BeCl_2	NH_4OH	$\text{Be}(\text{OH})_2$	Na_2SO_4 , ZnCl_2 , KNO_3
5	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	AgNO_3	Ag_2S	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, CH_3COOK , Na_2SO_4
6	AlCl_3	NaOH	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Na_2SO_4 , KNO_3 , CaCl_2
7	ZnCl_2	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	ZnS	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NaCl , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
8	K_2SO_4	$\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	BaSO_4	NH_4Cl , AlCl_3 , $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
9	CoCl_2	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	CoS	NaCl , K_2SO_4 , CaCl_2
10	FeCl_3	$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$	K_2SO_4 , NH_4NO_3 , AlCl_3
11	SnCl_2	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	SnS	Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, KCl
12	$\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2$	H_2SO_4	Hg_2SO_4	KNO_3 , NH_4NO_3 , Na_2SO_4
13	K_2CrO_4	AgNO_3	Ag_2CrO_4	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, NH_4NO_3 , CH_3COONa
14	AgNO_3	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$	$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$	NH_4NO_3 , NaCl , K_2SO_4
15	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$	H_2S	HgS	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
16	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$\text{Zn}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$	NaCl , K_2SO_4 , NH_4NO_3

Продовження таблиці 9.1

1	2	3	4	5
17	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	$\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	PbS	$\text{NaNO}_3, \text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2, \text{Al}(\text{NO}_3)_3$
18	$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	AgNO_3	$\text{Ag}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$\text{NH}_4\text{NO}_3, \text{H}_2\text{SO}_4, \text{CaCl}_2$
19	FeSO_4	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$	$\text{KNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{NaCl}$
20	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	AgNO_3	$\text{Ag}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	$\text{KNO}_3, (\text{NH}_4)_2\text{S}, \text{CH}_3\text{COONa}$
21	Na_2SiO_3	AgNO_3	Ag_2SiO_3	$\text{CH}_3\text{COOH}, \text{NH}_4\text{Cl}, \text{KNO}_3$
22	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$	KJ	HgJ_2	$\text{KNO}_2, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{CH}_3\text{COONa}$
23	Na_2S	NiSO_4	NiS	$\text{NH}_4\text{Cl}, \text{Na}_2\text{SO}_4, \text{SrCl}_2$
24	$\text{Be}(\text{NO}_3)_2$	NaOH	$\text{Bi}(\text{OH})_3$	$\text{NaNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{CH}_3\text{COONa}$
25	Na_3AsO_4	AgNO_3	Ag_3AsO_4	$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{CuCl}_2$
26	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KJ	PbJ_2	$\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{NH}_4\text{NO}_3, \text{AlBr}_3$
27	CrCl_3	NH_4OH	$\text{Cr}(\text{OH})_3$	$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{KCl}, \text{BaCl}_2$
28	MnCl_2	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	MnS	$\text{BaBr}_2, \text{K}_2\text{SO}_4, \text{NaCl}$
29	Na_2SiO_3	HCl	H_2SiO_3	$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{Al}(\text{NO}_3)_3, \text{NH}_4\text{Cl}$
30	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	PbS	$\text{CaCl}_2, \text{NaNO}_3, (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Васильев В. П. Аналитическая химия. Сборник вопросов, упражнений и задач : пособие для вузов / В. П. Васильев, Л. А. Кочергина, Т. Д. Орлова; под ред. В. П. Васильева. – 4-е изд., стереотип. – М. : Дрофа, 2006. – 318 с.
- 2 Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. И. Назаренко, Е. Ф. Некряч. – Киев. Наук. Думка, 1987. – 829 с.
- 3 Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии : Справ. изд. – 6-е изд., перераб. и доп. / Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1989. – 448 с.
- 4 Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К. П. Мищенко, А. А. Равделя. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Химия, 1965. – 160 с.
- 5 Основи колоїдної хімії: фізико-хімія поверхневих явищ і дисперсних систем : підручник / [М. О. Мchedlov-Петросян, В. І. Лебідь та ін.] ; за ред. М. О. Мchedlova-Петросяна. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2004. – 300 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Добуток розчинності електролітів за 25 °С [2]

Електроліт	ДР
AgCl	$1,78 \cdot 10^{-10}$
AgBr	$5,3 \cdot 10^{-13}$
Ag ₂ CrO ₄	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Ag ₃ PO ₄	$1,3 \cdot 10^{-20}$
Al(OH) ₃	$1,0 \cdot 10^{-32}$
BaCrO ₄	$1,2 \cdot 10^{-10}$
BaSO ₄	$1,1 \cdot 10^{-10}$
CaCO ₃	$3,8 \cdot 10^{-9}$
CaF ₂	$4,0 \cdot 10^{-11}$
Ca ₃ (PO ₄) ₂	$2,0 \cdot 10^{-29}$
CaSO ₄	$2,5 \cdot 10^{-5}$
CaC ₂ O ₄	$2,3 \cdot 10^{-9}$
CuCO ₃	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Fe(OH) ₂	$8 \cdot 10^{-16}$
Fe(OH) ₃	$6,3 \cdot 10^{-38}$
MgCO ₃	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Mg(OH) ₂	$7,1 \cdot 10^{-12}$
MgS	$2,0 \cdot 10^{-15}$
Mn(OH) ₂	$1,9 \cdot 10^{-13}$
MnCO ₃	$1,8 \cdot 10^{-11}$
PbCl ₂	$1,6 \cdot 10^{-5}$
PbF ₂	$2,7 \cdot 10^{-8}$
PbI ₂	$1,1 \cdot 10^{-9}$
PbCrO ₄	$1,8 \cdot 10^{-14}$
PbSO ₄	$1,6 \cdot 10^{-8}$
SrCrO ₄	$3,6 \cdot 10^{-5}$

Таблиця А.2 – Константи дисоціації електролітів за 25 °С [2]

Формула кислоти	K_d	Формула основи	K_d
H_2CO_3	$K_I = 4,45 \cdot 10^{-7}, K_{II} = 4,69 \cdot 10^{-11}$	$Al(OH)_3$	$K_{III} = 1,38 \cdot 10^{-9}$
$HClO$	$2,95 \cdot 10^{-8}$	$Cr(OH)_3$	$K_{III} = 1,02 \cdot 10^{-10}$
HCN	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$Cu(OH)_2$	$K_{II} = 3,4 \cdot 10^{-7}$
HNO_2	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$Fe(OH)_2$	$K_{II} = 1,3 \cdot 10^{-4}$
H_3PO_4	$K_I = 7,1 \cdot 10^{-3}, K_{II} = 6,2 \cdot 10^{-8},$ $K_{III} = 5,0 \cdot 10^{-13}$	$Fe(OH)_3$	$K_{III} = 1,35 \cdot 10^{-12}$
H_2S	$K_I = 1,0 \cdot 10^{-7}, K_{II} = 2,5 \cdot 10^{-13}$	NH_4OH	$1,76 \cdot 10^{-5}$
H_2SO_3	$K_I = 1,4 \cdot 10^{-2}, K_{II} = 6,2 \cdot 10^{-8}$	$Zn(OH)_2$	$K_{II} = 4 \cdot 10^{-5}$
H_2SiO_3 (18 °С)	$K_I = 2,2 \cdot 10^{-10}, K_{II} = 1,6 \cdot 10^{-12}$		
$HCOOH$	$1,8 \cdot 10^{-4}$		
CH_3COOH	$1,74 \cdot 10^{-5}$		
$HOOC-COOH$	$K_I = 5,6 \cdot 10^{-2}, K_{II} = 5,4 \cdot 10^{-5}$		

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Номери завдань даного варіанта за розділами

Номер варіанта	Номери завдань даного варіанта за розділами								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1; 20
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2; 20
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3; 20
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4; 20
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5; 20
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6; 20
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7; 20
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8; 20
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9; 20
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10; 20
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11; 20
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12; 20
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13; 20
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14; 20
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15; 20
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16; 20
17	17	17	17	17	17	1	17	1	17; 20
18	18	18	18	18	18	2	18	2	18; 20
19	19	19	19	19	19	3	19	3	19; 20
20	20	20	20	20	20	4	20	4	1; 20
21	21	21	21	21	21	5	21	5	2; 20
22	22	22	22	22	22	6	22	6	3; 20
23	23	23	23	23	23	7	23	7	4; 20
24	24	24	24	24	24	8	24	8	5; 20
25	25	25	25	25	25	9	25	9	6; 20
26	26	26	26	26	26	10	26	10	7; 20
27	27	27	27	27	27	11	27	11	8; 20
28	28	28	28	28	28	12	28	12	9; 20
29	29	29	29	29	29	13	29	13	10; 20
30	30	30	30	30	30	14	1	14	11; 20
31	1	1	1	1	1	15	2	15	12; 20
32	2	2	2	2	2	16	3	16	13; 20
33	3	3	3	3	3	1	4	1	14; 20
34	4	4	4	4	4	2	5	2	15; 20
35	5	5	5	5	5	3	6	3	16; 20
36	6	6	6	6	6	4	7	4	17; 20
37	7	7	7	7	7	5	8	5	18; 20
38	8	8	8	8	8	6	9	6	19; 20

Продовження таблиці Б.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
39	9	9	9	9	9	7	10	7	1; 20
40	10	10	10	10	10	8	11	8	2; 20
41	11	11	11	11	11	9	12	9	3; 20
42	12	12	12	12	12	10	13	10	4; 20
43	13	13	13	13	13	11	14	11	5; 20
44	14	14	14	14	14	12	15	12	6; 20
45	15	15	15	15	15	13	16	13	7; 20
46	16	16	16	16	16	14	17	14	8; 20
47	17	17	17	17	17	15	18	15	9; 20
48	18	18	18	18	18	16	19	16	10; 20
49	19	19	19	19	19	1	20	1	11; 20
50	20	20	20	20	20	2	21	2	12; 20
51	21	21	21	21	21	3	22	3	13; 20
52	22	22	22	22	22	4	23	4	14; 20
53	23	23	23	23	23	5	24	5	15; 20
54	24	24	24	24	24	6	25	6	16; 20
55	25	25	25	25	25	7	26	7	17; 20
56	26	26	26	26	26	8	27	8	18; 20
57	27	27	27	27	27	9	28	9	19; 20
58	28	28	28	28	28	10	29	10	1; 20
59	29	29	29	29	29	11	1	11	2; 20
60	30	30	30	30	30	12	2	12	3; 20
61	1	1	1	1	1	13	3	13	4; 20
62	2	2	2	2	2	14	4	14	5; 20
63	3	3	3	3	3	15	5	15	6; 20
64	4	4	4	4	4	16	6	16	7; 20
65	5	5	5	5	5	1	7	1	8; 20
66	6	6	6	6	6	2	8	2	9; 20
67	7	7	7	7	7	3	9	3	10; 20
68	8	8	8	8	8	4	10	4	11; 20
69	9	9	9	9	9	5	11	5	12; 20
70	10	10	10	10	10	6	12	6	13; 20
71	11	11	11	11	11	7	13	7	14; 20
72	12	12	12	12	12	8	14	8	15; 20
73	13	13	13	13	13	9	15	9	16; 20
74	14	14	14	14	14	10	16	10	17; 20
75	15	15	15	15	15	11	17	11	18; 20
76	16	16	16	16	16	12	18	12	19; 20
77	17	17	17	17	17	13	19	13	1; 20
78	18	18	18	18	18	14	20	14	2; 20
79	19	19	19	19	19	15	21	15	3; 20

Закінчення таблиці Б.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	20	20	20	20	20	16	22	16	4; 20
81	21	21	21	21	21	1	23	1	5; 20
82	22	22	22	22	22	2	24	2	6; 20
83	23	23	23	23	23	3	25	3	7; 20
84	24	24	24	24	24	4	26	4	8; 20
85	25	25	25	25	25	5	27	5	9; 20
86	26	26	26	26	26	6	28	6	10; 20
87	27	27	27	27	27	7	29	7	11; 20
88	28	28	28	28	28	8	1	8	12; 20
89	29	29	29	29	29	9	2	9	13; 20
90	30	30	30	30	30	10	3	10	14; 20
91	1	1	1	1	1	11	4	11	15; 20
92	2	2	2	2	2	12	5	12	16; 20
93	3	3	3	3	3	13	6	13	17; 20
94	4	4	4	4	4	14	7	14	18; 20
95	5	5	5	5	5	15	8	15	19; 20
96	6	6	6	6	6	16	9	16	1; 20
97	7	7	7	7	7	1	10	1	2; 20
98	8	8	8	8	8	2	11	2	3; 20
99	9	9	9	9	9	3	12	3	4; 20
100	10	10	10	10	10	4	13	4	5; 20

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації
до виконання самостійної та контрольної роботи
з навчальної дисципліни

«НЕОРГАНІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ ДОВКІЛЛЯ»

*(для студентів 1–3 курсу денної та заочної форм навчання першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності
101 – Екологія, 183 – Технології захисту навколишнього середовища)*

Укладачі: **ЗАЙЦЕВА** Інна Сергіївна,
ПАНАЙОТОВА Тетяна Дмитрівна,
МУРАЄВА Ольга Олексіївна

Відповідальний за випуск *Т. Д. Панайотова*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *І. С. Зайцева*

План 2018, поз. 176 М

Підп. до друку 03.06.2019. Формат 60 × 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 3,4.
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.