

Міністерство освіти і науки України
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Аграрний факультет

Методичні вказівки
до виконання контрольної роботи з дисципліни

«АНАЛІТИЧНА ХІМІЯ»

(для студентів заочної форми навчання спеціальності
G13 Харчові технології)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
ветеринарії та тваринництва
Протокол № 2 від 20 лютого 2026 р.

на засіданні методичної комісії аграрного
факультету
Протокол № 4 від 30 квітня 2026 р.

Київ, 2026

УДК 543

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни “Аналітична хімія” (для студентів заочної форми навчання спеціальності G13 Харчові технології) / Укладач О.І. Захарова – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2026 – 99 с.

Методичне видання спрямоване на вивчення і засвоєння студентами самостійно та на підставі лекційного матеріалу теоретичних основ дисципліни “Аналітична хімія». Методична розробка містить стислі теоретичні відомості, довідникові дані, приклади розв’язання типових задач та завдання контрольної роботи для студентів заочної форми навчання.

Укладач:

О.І. Захарова, доцент

Рецензент:

В.Ф. Могутова, к.с.-г.н., доцент

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Теоретичні основи аналітичної хімії	5
1.1. Способи виразу концентрації розчинів	5
1.2. Протолітичні рівноваги в розчинах кислот та основ	11
1.3. Рівноваги в буферних розчинах	14
1.4. Рівноваги в розчинах солей, які гідролізують	17
1.5. Рівноваги в гетерогенних системах	22
1.6. Рівноваги в окисно-відновних реакціях	25
2. Кількісний аналіз	28
2.1. Метод нейтралізації (кисотно-основного титрування)	28
2.2. Метод окисно-відновного титрування	32
2.3. Електрохімічні методи аналізу	34
2.4. Оптичні методи аналізу. Спектрофотометрія	45
2.5. Хроматографічні методи аналізу	56
Додатки	66
Таблиця 1 - Найважливіші фізичні сталі	66
Таблиця 2 - Формули для розрахунку рН	67
Таблиця 3 - Густина водних розчинів кислот та основ	67
Таблиця 4 - Константи іонізації важливіших кислот	77
Таблиця 5 - Константи іонізації важливіших основ	83
Таблиця 6 - Добуток розчинності	84
Таблиця 7 - Стандартні електродні потенціали (E°) при 25 °C	887
Зразок оформлення титульного листа контрольної роботи	96
3. Література	97

Вступ

Аналітична хімія є фундаментальною хімічною дисципліною підготовки бакалаврів, яка пов'язує дисципліни фундаментального циклу із спеціальними. З одного боку, аналітична хімія є складовою частиною хімії і тому має тісний зв'язок з такими дисциплінами, як неорганічна, органічна, фізична і колоїдна хімії, а також широко використовує знання фізики, математики, обчислювальної техніки та ін. З другого боку, аналітична хімія відіграє суттєву роль у професійній підготовці фахівця в галузі харчових технологій, тому що дає знання та вміння, необхідні для засвоєння спеціальних дисциплін. Вона є не тільки основою вивчення методів технологічного контролю виробництва, контролю якості продукції, а й інструментом подальшого вдосконалення технологічних процесів, створення нових продуктів та засобом екологічного виховання майбутніх фахівців. Це відповідає вимогам до якості знань та вмінь особи, яка здобуває освітній рівень бакалавра.

Предметом аналітичної хімії є теорія та практика хімічного аналізу. Вивчення дисципліни передбачає такі види навчальних занять: лекції, лабораторні заняття, самостійну роботу, індивідуальну творчу роботу студентів під керівництвом викладача.

Метою вивчення дисципліни є оволодіння сучасними методами аналізу речовин та їх застосування для вирішення конкретних практичних завдань.

Дана методична розробка призначена для студентів заочної форми навчання. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи містять стисли теоретичні відомості, приклади розв'язання та оформлення завдань, необхідний довідниковий матеріал, завдання контрольної роботи.

Студенти заочної форми навчання у II семестрі виконують контрольну роботу, яка складається з 6 завдань розрахункового характеру з теоретичних основ аналітичної хімії та 5 завдань кількісного аналізу. Завдання контрольної роботи наведені в кінці кожного розділу, номер варіанту співпадає з номером завдання. Контрольна робота з титульним листом, який оформлено за зразком, закріплюється на сторінці дисципліни в електронному університеті і перевіряється викладачем.

1. Теоретичні основи аналітичної хімії

1.1. Способи виразу концентрації розчинів

Масова частка розчиненої речовини $\omega(X)$ – це відношення маси розчиненої речовини $m(X)$ до маси розчину m_p :

$$\omega(X) = \frac{m(X)}{m_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

Масову частку виражають у частках одиниці або у відсотках (% - сота частка одиниці).

Якщо масова частка натрію хлориду в розчині дорівнює 20%, це означає, що розчин масою 100 г містить 20 г натрію хлориду.

Молярна концентрація розчиненої речовини $c(X)$ – це кількість розчиненої речовини, що міститься в 1 дм³ (1 л) розчину. Молярна концентрація розчиненої речовини обчислюється як відношення кількості розчиненої речовини $\nu(X)$, до об'єму V розчину (розмірність – моль/дм³, або моль/л):

$$c(X) = c_M = \frac{\nu(X)}{V} = \frac{m(X)}{M(X) \cdot V} \quad (2)$$

де $\nu(X)$ або $n(X)$ – кількість речовини (моль); V – об'єм (дм³ або л).

Назви розчинів з різною молярною концентрацією розчиненої речовини:

$c = 1$ моль/дм³, або 1 М – одномолярний розчин;

$c = 0,1$ моль/дм³, або 0,1 М – децимолярний розчин;

$c = 0,01$ моль/дм³, або 0,01 М – сантимольярний розчин;

$c = 0,001$ моль/дм³, або 0,001 М – мілімолярний розчин.

На практиці також широко використовують **молярну концентрацію речовини еквівалента в розчині (c_H)**. Вона є відношенням кількості речовини еквівалента в розчині $\nu(X)$ до об'єму цього розчину (розмірність моль/дм³, або моль/л):

$$c_H(X) = \frac{\nu_{екв}(X)}{V} = \frac{m(X)}{M_E(X) \cdot V} \quad (3)$$

Якщо розчин містить 1 моль речовини еквівалента в 1 л, то його називають нормальним. Замість позначення одиниці вимірювання моль/дм³, або моль/л, можна використовувати скорочення «н» або «N». При використанні цих скорочень, необхідно вказувати $f_{екв}$. Наприклад, 0,1 N KIO₃ ($f_{екв}=1/6$) або 0,1 N (1/6 KIO₃).

Переваги використання розчинів з нормальною концентрацією полягають у тому, що розчини з однаковими нормальними концентраціями реагують в однакових об'ємах.

Якщо нормальні концентрації відрізняються, то вірне рівняння:

$$c_1 \cdot V_1 = c_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

Титр розчину - це виражена у грамах маса розчиненої речовини, що міститься в 1 см³ (1 мл) розчину. Титр $T(X)$ обчислюють як відношення маси розчиненої речовини $m(X)$ до об'єму розчину (розмірність г/см³, або г/мл):

$$T(X) = \frac{m(X)}{V} = \frac{c_H(X) \cdot M_E(X)}{1000} \quad (5)$$

Титр титранту за визначуваною речовиною (або умовний титр) $T(Y/X)$ – виражена в грамах маса визначуваної речовини X, що еквівалентна 1 мл титранту Y з теоретичною молярною концентрацією речовини еквівалента (розмірність г/см³, або г/мл):

$$T(T / X) = \frac{c_H(T) \cdot M_E(X)}{1000} \quad (6)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Яку масу калій фосфату і який об'єм води потрібно взяти для приготування розчину масою 250 г з масовою часткою K₃PO₄ 8 %?

Розв'язок. З формули (1) визначаємо масу речовини:

$$m(X) = m_{p-ну} \cdot \omega(X)$$

Отже, маса солі, яка потрібна для приготування розчину, складає
 $m(K_3PO_4) = 250 \cdot 0,08 = 20$ (г).

Маса розчину складається з маси речовини та маси розчинника. Знаходимо масу води, необхідну для приготування розчину:

$$m(H_2O) = m_{p-ну} - m(K_3PO_4) = 250 - 20 = 230$$
 (г).

Прийнявши густину води такою, що дорівнює 1 г/см³ (в одиницях СІ її виражають у кг/м³, а в позасистемних одиницях – г/см³, або г/мл), визначаємо об'єм води:

$$V(H_2O) = \frac{m_{p-ну}}{\rho_{p-ну}} = \frac{230}{1} = 230 \text{ см}^3.$$

Приклад 2. Яку масу кристалогідрату CaCl₂·6H₂O і який об'єм води потрібно взяти для приготування розчину кальцій хлориду масою 500 г з масовою часткою CaCl₂ 5 %?

Розв'язок. Спочатку з формули (1) визначаємо масу безводного кальцій хлориду CaCl₂, що міститься в 500 г розчину з масовою часткою 5 %:

$$m(CaCl_2) = 500 \cdot 0,05 = 25$$
 (г).

Далі проводимо перерахунок на кристалогідрат, враховуючи, що $M(CaCl_2) = 111$ г/моль, а $M(CaCl_2 \cdot 6H_2O) = 219$ г/моль.

$$111 \text{ г CaCl}_2 - 219 \text{ г CaCl}_2 \cdot 6H_2O;$$

$$25 \text{ г CaCl}_2 - x \text{ г CaCl}_2 \cdot 6H_2O;$$

$$x = \frac{219 \cdot 25}{111} = 49,32 \text{ г.}$$

Отже, для приготування 500 г розчину з масовою часткою безводної солі 5 % потрібно взяти 49,3 г кристалогідрату $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Визначаємо масу води:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = m_{p-\text{ну}} - m(\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 500 - 49,32 = 450,68 \text{ г.}$$

Об'єм води складає $450,68 \text{ см}^3$, оскільки густина води ρ дорівнює 1 г/см^3 .

Приклад 3. Визначити об'єм концентрованої нітратної кислоти HNO_3 ($\omega(\text{HNO}_3) = 65\%$) і води, необхідні для приготування розчину масою 500 г з масовою часткою HNO_3 15 %.

Розв'язок. Визначаємо масу HNO_3 , яка має міститись у 500 г розчину з масовою часткою HNO_3 0,15 з формули (1):

$$m(\text{HNO}_3) = 500 \cdot 0,15 = 75 \text{ (г)}.$$

Така сама маса HNO_3 має міститись і в розчині m_1 з масовою часткою 0,65. Тому

$$m_1 = \frac{m(\text{HNO}_3)}{\omega_1(\text{HNO}_3)} = \frac{75}{0,65} = 115,38 \text{ г.}$$

За довідними даними густина 65 %-вого розчину HNO_3 складає $1,39 \text{ г/см}^3$. Визначимо об'єм концентрованої кислоти :

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho} = \frac{115,38}{1,39} = 83,00 \text{ см}^3,$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 500 - 115,38 = 384,62 \text{ г, що становить } 384,62 \text{ см}^3.$$

Приклад 4. У лабораторії є розчин з масовою часткою натрій гідроксиду $\omega_1 = 30\%$, густина якого $\rho_1 = 1,33 \text{ г/см}^3$. Який об'єм цього розчину потрібно взяти для приготування 250 см^3 розчину з масовою часткою NaOH $\omega_2 = 14\%$ і густиною $\rho_2 = 1,15 \text{ г/см}^3$?

Розв'язок. Масу розчину натрій гідроксиду, який потрібно приготувати, знаходимо за формулою:

$$m_{p-\text{ну}} = V_{p-\text{ну}} \cdot \rho_{p-\text{ну}}$$

$$m_{p-\text{ну}}(\text{NaOH}) = 250 \cdot 1,15 = 287,5 \text{ г.}$$

Визначаємо масу розчиненої речовини в цьому розчині:

$$m(\text{NaOH}) = 287,5 \cdot 0,14 = 40,25 \text{ (г)}.$$

Така сама маса натрій гідроксиду має міститись у вихідному розчині масою m_1 з масовою часткою лугу 0,3:

$$m_1 = \frac{m(\text{NaOH})}{\omega_1(\text{NaOH})} = \frac{40,25}{0,3} = 134,17 \text{ г.}$$

Обчислимо об'єм розчину натрій гідроксиду з масовою часткою 0,3:

$$V_{1p-\text{ну}} = \frac{m_1}{\rho_1} = \frac{134,17}{1,33} = 100,88 \text{ см}^3.$$

Отже, потрібно виміряти мензуркою $100,88 \text{ см}^3$ розчину натрій гідроксиду ($\omega_1=0,3$), перелити його в мірну колбу місткістю 250 см^3 , довести об'єм розчину дистильованою водою до мітки на колбі й перемішати.

Можна також визначити об'єм води, який становитиме

$$V(\text{H}_2\text{O}) = V_{p-ny} - V_{l p-ny} = 250 - 100,88 = 149,12 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Потім треба виміряти мензуркою цей об'єм води і змішати його в колбі з натрій гідроксидом об'ємом $100,88 \text{ см}^3$.

Приклад 5. До розчину масою 250 г з масовою часткою розчиненої речовини 10% долили 150 г води. Яка масова частка розчиненої речовини в отриманому розчині?

Розв'язок. Обчислюємо вміст речовини у вихідному розчині:

$$m_{\text{реч}} = 250 \cdot 0,1 = 25 \text{ г.}$$

Визначаємо загальну масу отриманого розчину:

$$m_{l p-ny} = m_{p-ny} + m(\text{H}_2\text{O}) = 250 + 150 = 400 \text{ г.}$$

Оскільки до розчину добавляють тільки воду, то маса розчиненої речовини в отриманому розчині буде такою самою, як і у вихідному, отже:

$$\omega_1 = \frac{m_{\text{реч}}}{m_1} = \frac{25}{400} = 0,0625, \text{ або } 6,25 \%.$$

Приклад 6. Дано два розчини з масовою часткою натрій хлориду 10% і 20% . Яку масу кожного розчину потрібно взяти для одержання розчину масою 300 г з масовою часткою солі 12% ?

Розв'язок. Задачі такого типу розв'язують за правилом змішування, суть якого полягає ось у чому.

Записуємо масові частки вихідних розчинів одну під одною, а правіше, по діагоналі – масову частку речовини в розчині, який потрібно приготувати:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & 20 & & \\
 & & & 12 & \\
 & & 10 & & \\
 \text{Віднімаємо числа, як показано на схемі, і записуємо результат:} & & & & \\
 0 & \searrow & 12 & \nearrow & 2 \\
 & & & & 1 \\
 10 & \nearrow & 12 & \searrow & 8 \\
 & & & & 4
 \end{array}$$

або

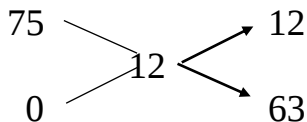
Числа 1 і 4 показують співвідношення, в якому потрібно взяти вихідні розчини. Розчину з масовою часткою 20% потрібно одну частину за масою, а з масовою часткою 10% – 4 частини, тобто їх треба змішати у співвідношенні $1 : 4$.

Розчин, який треба приготувати має складатись з 5 частин, причому на одну частину припадає $300 : 5 = 60 \text{ (г)}$. Отже, розчину з масовою часткою 20% потрібно 60 г , а другого – 240 г ($60 \cdot 4 = 240$).

Зазначимо, що при використанні правила змішування в деяких задачах воду можна розглядати як розчин з масовою часткою розчиненої речовини, що дорівнює нулю.

Приклад 7. Визначити об'єм розчину фосфатної кислоти з масовою часткою H_3PO_4 75 %, яку потрібно долити до $1,5 \text{ дм}^3$ води, щоб приготувати розчин з масовою часткою кислоти 12 %.

Розв'язок. Записуємо масові частки кислоти, як показано на схемі в попередньому прикладі, враховуючи, що вміст кислоти в чистій воді дорівнює нулю:



$$\text{Отже, } \frac{m(75\%)}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{12}{63},$$

$$\text{звідки, } m(75\%) = \frac{1500 \cdot 12}{63} = 285,7 \text{ г.}$$

Визначаємо об'єм розчину з масовою часткою 75 %, використовуючи табличні дані, які пов'язують густину і масову частку розчину ($\rho(\text{H}_3\text{PO}_4) = 1,58 \text{ г/см}^3$), отже:

$$V_{p-ny} = \frac{m}{\rho} = \frac{285,7}{1,58} = 180,82 \text{ см}^3.$$

Приклад 8. Який об'єм розчину з масовою часткою сульфатної кислоти 9,3 % (густина $1,05 \text{ г/см}^3$) потрібен для приготування $0,35 \text{ М}$ розчину H_2SO_4 об'ємом 400 см^3 ?

Розв'язок. Визначаємо кількість речовини H_2SO_4 , необхідної для приготування розчину за формулою:

$$\nu(\text{H}_2\text{SO}_4) = c_M \cdot V_{\text{роз-ну}} = 0,35 \text{ моль/дм}^3 \cdot 0,4 \text{ дм}^3 = 0,14 \text{ моль.}$$

Знаходимо масу розчиненої речовини:

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = \nu \cdot M(X) = 0,14 \text{ моль} \cdot 98 \text{ г/моль} = 13,72 \text{ г.}$$

Визначаємо масу розчину з масовою часткою кислоти 9,3 %, в якому міститься 13,72 г кислоти:

$$m_{p-ny} = \frac{m(\text{H}_2\text{SO}_4)}{\omega(\text{H}_2\text{SO}_4)} = \frac{13,72}{0,093} = 147,53 \text{ г,}$$

або за пропорцією

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ г р-ну} & - & 9,3 \text{ г } \text{H}_2\text{SO}_4 \\ x \text{ г р-ну} & - & 13,72 \text{ г } \text{H}_2\text{SO}_4 \end{array}$$

$$x = 147,53 \text{ г.}$$

Визначаємо об'єм розчину:

$$V_{p-ny} = \frac{m_{p-ny}}{\rho_{p-ny}} = \frac{147,53}{1,06} = 139,18 \text{ см}^3$$

Приклад 9. Який об'єм концентрованої хлоридної кислоти ($\rho = 1,198 \text{ г/см}^3$) потрібен для приготування розчину об'ємом 2 дм^3 з молярною концентрацією еквівалента $0,1 \text{ моль/дм}^3$?

Розв'язок. Визначаємо масу хлоридної кислоти, використовуючи формулу (3):

$$m(X) = c_H(X) \cdot V_{p-ny} \cdot M_E(X), \text{ звідки}$$

$$m(HCl) = 0,1 \cdot 2 \cdot 36,5 = 7,3 \text{ (г)}.$$

За даними таблиці (3) знаходимо масову частку вихідного розчину ω за даною в умові густиною (це розчин з масовою часткою HCl 40 %) і обчислюємо масу цього розчину:

$$m_{p-ny} = \frac{m(X)}{\omega(X)} = \frac{7,3}{0,4} = 18,25 \text{ г}.$$

Обчислюємо об'єм вихідного розчину кислоти, який треба взяти для приготування заданого розчину:

$$V_{p-ny} = \frac{m_{p-ny}}{\rho_{p-ny}} = \frac{18,25}{1,148} V_{p-ny} = 15,23 \text{ см}^3.$$

Приклад 10. Визначити молярність і молярну концентрацію еквівалента розчину, в якому масова частка сульфатної кислоти становить 12 % ($\rho = 1,08 \text{ г/см}^3$).

Розв'язок. Знаходимо молярність і молярну масу еквівалента кислоти, використовуючи формули (2) та (3):

$$M(H_2SO_4) = 98 \text{ г/моль}, M_E(H_2SO_4) = 98 : 2 = 49 \text{ г/моль};$$

$$c_M(H_2SO_4) = \frac{12 \cdot 1,08 \cdot 10}{98} = 1,32 \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$c_H(H_2SO_4) = \frac{12 \cdot 1,08 \cdot 10}{49} = 2,64 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

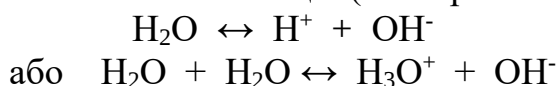
ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Визначити відсоткову масову частку речовини у розчині, отриманого в результаті розчинення 90 г речовини в 180 см³ води?
2. Скільки грамів Na₂SO₃ буде потрібно для приготування 5 дм³ 8 %-вого розчину, густина якого 1,05 г/см³?
3. Скільки грамів HCl міститься в 250 см³ 10 %-вого розчину, густина якого 1,05 г/см³?
4. Скільки грамів Na₂SO₄·10H₂O треба розчинити в 250 см³ води для одержання розчину, що містить 5 % безводної солі?
5. Яку кількість Na₂B₄O₇·10H₂O і води треба взяти для приготування 3 кг розчину, що містить 4 % безводної солі?
6. Скільки моль MnSO₄·5H₂O необхідно додати до 100 моль води для одержання розчину, що містить 20 % безводної солі?
7. Скільки води необхідно додати до 200 см³ 20 %-вого розчину H₂SO₄ (густина 1,14г/см³), щоб одержати 5 %-вий розчин?
8. Скільки грамів KCl треба додати до 450 г 8 %-вого розчину тієї ж солі для одержання 12 %-вого розчину?
9. До 950 см³ води додали 50 см³ 48 %-вого розчину H₂SO₄ (густина 1,38г/см³). Обчислити масову частку H₂SO₄ в отриманому розчині.

10. Який об'єм (дм³) 2,5 %-вого розчину NaOH (густина 1,03 г/см³), можна приготувати з 80 см³ 35 %-вого розчину (густина 1,38 г/см³).
11. Чому дорівнює молярна концентрація розчину, що містить у 3 дм³ 175,5г повареної солі?
12. Обчислити молярну концентрацію розчину, що містить у 2 дм³ 34,8 г K₂SO₄.
13. Скільки грамів NaOH необхідно взяти для приготування 125 см³ 0,15 М розчину?
14. Який об'єм 70 %-вого розчину H₂SO₄ (густина 1,622 г/см³) треба взяти для приготування 25,00 см³ 2 М розчину?
15. Скільки грамів HNO₃ міститься в 200 см³ 0,1 М розчину?
16. Скільки води треба додати до 200 см³ 1 н. розчину NaOH, щоб одержати 0,05 н. розчин?
17. До якого об'єму необхідно упарити 3,5 дм³ 0,04 н. розчину KOH для одержання 0,1 н. розчину?
18. До якого об'єму треба розбавити водою 2,4 дм³ 1,6 н. розчин HCl для одержання 0,25 н. розчину?
19. Скільки грамів HNO₃ міститься у 300 см³ 0,2 н. розчину?
20. Скільки см³ 0,1 н. розчину H₃PO₄ можна приготувати з 80 см³ 0,75 н. розчину?

1.2. Протолітичні рівноваги в розчинах кислот та основ

У практиці аналітичної хімії найчастіше мають справи з водними розчинами кислот, основ чи солей, які є електролітами. У водних розчинах на поведінку кислот і основ впливає іонізація (автопротоліз) води:



Константа рівноваги цього процесу $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 1 \cdot 10^{-14}$ – іонний добуток води за 25 °С.

Концентрація іонів гідрогену характеризує кислотність розчину. Кислотність середовища позначають водневим показником рН.

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]; \quad \text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] \quad (7)$$

У чистій воді $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \cdot 10^{-7}$ моль/дм³; $-\lg[\text{H}^+] = -\lg[\text{OH}^-] = -\lg 10^{-7} = 7$;
Для води і розбавлених водних розчинів виконується рівність:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (8)$$

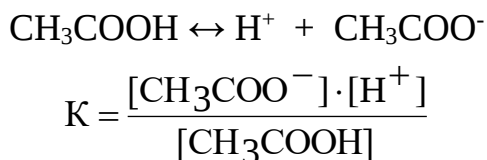
У розведених водних розчинах сильних одноосновних кислот і речовин, водні розчини яких мають властивості сильних кислот, рівноважна молярна концентрація іонів H⁺ дорівнює молярній концентрації кислоти:

$$[\text{H}^+] = c(\text{HA}), \text{ тобто} \\ \text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg c(\text{HA}) \quad (10)$$

У розведених водних розчинах сильних основ рівноважна молярна концентрація іонів OH⁻ дорівнює молярній концентрації сильної основи:

$$[\text{OH}^-] = c(\text{KtOH}). \quad \text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] = -\lg c(\text{KtOH}), \text{ тобто} \\ \text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 + \lg c(\text{KtOH}) \quad (11)$$

Реакції у водних розчинах слабких кислот і основ – це реакції між іонами. Будучи оборотним, процес дисоціації слабких кислот і основ характеризується константою рівноваги (константою дисоціації або іонізації). Наприклад, константа електролітичної дисоціації ацетатної кислоти:



де:

$[\text{H}^+]$ і $[\text{CH}_3\text{COO}^-]$ – рівноважні молярні концентрації катіонів і аніонів, $[\text{CH}_3\text{COOH}]$ – рівноважна молярна концентрація недисоційованих молекул електроліту.

За рівнянням дисоціації: $[\text{H}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-]$, отже

$$[\text{H}^+] = \sqrt{K_a \cdot c} \quad (12)$$

Розрахунок pH у розчинах слабких кислот проводять за рівнянням:

$$\text{pH} = 1/2\text{p}K_a - 1/2\lg c_k, \quad (13)$$

Розрахунок pH у розчинах слабких основ проводять за рівнянням:

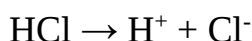
$$\text{pH} = 14 - 1/2\text{p}K_b + 1/2\lg c_{\text{осн}} \quad (14)$$

де: $\text{p}K = -\lg K$ – силовий показник слабкої кислоти або основи.

Приклади розв'язання задач

Приклад 11. Розрахувати pH розчину 0,05 моль/л хлоридної кислоти.

Розв'язок. Хлоридна кислота - сильний електроліт, тому у водних розчинах дисоціює повністю:



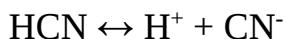
Отже, $[\text{H}^+] = [\text{Cl}^-] = 0,05$ моль/л.

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg 0,05 = 1,31.$$

Відповідь: pH = 1,31

Приклад 12. Розрахувати $[\text{H}^+]$, pH в 0,4 %-вому розчині ціанатної кислоти.

Розв'язок. Ціанатна кислота – слабкий електроліт, тому у водних розчинах вона дисоціює не повністю відповідно рівнянню:



Константа рівноваги цього процесу називається константою дисоціації і дорівнює $K_a = 5,0 \cdot 10^{-10}$.

Отже у даному випадку концентрація іонів гідрогену залежить від константи дисоціації та концентрації кислоти (рівняння 12 та 13):

$$[\text{H}^+] = \sqrt{K_a \cdot c}, \text{ або } \text{pH} = 1/2\text{p}K_a - 1/2\lg c$$

Для переведення масової відсоткової частки $w, \%$ в молярну концентрацію користуються формулою:

$$C = \frac{10 \cdot w \cdot \rho}{M} = \frac{10 \cdot 0,4 \cdot 1}{27,02} = 0,143 \text{ моль/л}$$

Приймаємо $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ унаслідок малої концентрації розчину HCN.

Розрахуємо $[\text{H}^+]$ та pH розчину:

$$[\text{H}^+] = \sqrt{0,143 \cdot 5,0 \cdot 10^{-10}} = 8,06 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg(8,06 \cdot 10^{-6}) = 5,06.$$

Відповідь: pH = 5,06, $[\text{H}^+] = 8,06 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$

Приклад 13. Розрахувати $[\text{H}^+]$ і $[\text{OH}^-]$ в розчині, pH якого дорівнює 9,15.

Розв'язок. Згідно з визначенням $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$, тоді

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-9,15} = 7,08 \cdot 10^{-10} \text{ моль/л.}$$

З іонного добутку води $K_w = [\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-14}$, розрахуємо $[\text{OH}^-]$:

$$[\text{OH}^-] = K_w / [\text{H}^+] = 10^{-14} / (7,08 \cdot 10^{-10}) = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Відповідь: $[\text{H}^+] = 7,08 \cdot 10^{-10} \text{ моль/л.}$, $[\text{OH}^-] = 1,41 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1-20. Розрахуйте pH і концентрацію водневих іонів:

1. а) 0,01 М водного розчину бензойної кислоти;
б) розчину, який містить у 500 см³ 2 г NaOH.
2. а) 0,5 М водного розчину оцтової кислоти;
б) розчину, який отриманого розведенням водою 200 см³ 12 %-вого розчину KOH до 1 літра.
3. а) 0,1 М водного розчину форміатної кислоти;
б) розчину, який отриманого при змішуванні 100 см³ 0,2 М розчину HCl зі 100 см³ 0,1 М розчину KOH.
4. а) 0,001 М водного розчину ціанової кислоти;
б) 0,2 н. водного розчину амоніаку.
5. а) 0,05 М розчину дихлороцтової кислоти;
б) розчину, що містить 0,56 г KOH в одному літрі.
6. а) 0,03 М розчину мурашиної кислоти;
б) 0,01 н. розчину калію гідроксиду.
7. а) 0,002 М розчину нітратної кислоти;
б) розчину, який утворюється при змішуванні 70 см³ 0,2 н. розчину NaOH з 30 см³ 0,4 н. розчину HCl.
8. а) 0,05 М розчину метиламіну;
б) розчину, який містить у 750 см³ 4,5 г оцтової кислоти.
9. а) 0,05 М розчину карбонатної кислоти, враховуючи перший ступінь дисоціації;
б) 0,01 н. водного розчину амоніаку.
10. а) 0,03 М водного розчину сірководню;
б) розчину, який містить у 500 см³ 2 г NaOH.
11. а) 0,02 М розчину нітритної кислоти;
б) 0,2 %-вого розчину гідроксиду барію.

12. а) 0,03 М розчину ортофосфорної кислоти;
б) розчину, який містить у 200 см³ 1,12 г КОН.
13. а) 0,04 М розчину флуоридної кислоти;
б) розчину, який отримано розведенням водою 100 см³ 10 %-вого розчину КОН до одного літру.
14. а) 0,017 М розчину сульфатної кислоти;
б) 0,1 н. розчину NaOH.
15. а) 0,2 М розчин бензоатної кислоти;
б) 0,1 н. розчину КОН, ступінь дисоціації якого 90 %.
16. а) 0,06 М розчину селенатної кислоти;
б) 10 см³ 0,01 н. розчину КОН, який розбавили водою до 100 см³.
17. а) 0,04 М розчину телуратної кислоти;
б) 0,1 М розчину NaOH, ступінь дисоціації якого 84 %.
18. а) 0,1 н. розчину хлоридної кислоти;
б) при змішуванні 10 см³ 0,15 н. розчину NaOH і 10 см³ 0,2 н. розчину HCl.
19. а) розчину, отриманого розведенням водою 10 см³ 5 %-вого розчину сульфатної кислоти до 100 см³;
б) при змішуванні 10 см³ 0,07 н. розчину КОН і 15 см³ 0,05 н. розчину HCl.
20. а) розчину 0,23 % форміатної кислоти (густина прийняти рівній одиниці);
б) 0,5 %-вого розчину КОН.

1.3. Рівноваги в буферних розчинах

Для забезпечення сталого значення рН у хімічних і біологічних системах використовують буферні розчини. Буферний розчин перешкоджає зміні рН, яка може траплятися при розведенні розчину або при додаванні до нього сильної кислоти чи сильної основи.

Буферні розчини – це суміш слабкої кислоти і солі цієї кислоти, або суміш слабкої основи і солі цієї основи, або суміш розчинів солей багато основних кислот різного ступеня заміщення.

Наприклад:

Ацетатна буферна суміш - $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{COONa}$

Амоніачна буферна суміш – $\text{NH}_4\text{OH} + \text{NH}_4\text{Cl}$

Фосфатна буферна суміш – $\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$

Величина рН, за якої проявляється буферна дія суміші, залежить від співвідношення у буферному розчині концентрацій спряжених кислоти і основи, від константи іонізації слабкої кислоти чи основи, які входять до складу суміші.

Якщо буферний розчин є сумішшю слабкої кислоти і солі цієї кислоти, то рН розраховують за формулою:

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = \text{pK}_a - \lg \frac{c_{\text{кисл}}}{c_{\text{солі}}} \quad (15)$$

Якщо буферний розчин є сумішшю слабкої основи і солі цієї основи, то pH розраховують за формулою:

$$\text{pH} = 14 - \text{pK}_b + \lg \frac{c_{\text{осн}}}{c_{\text{солі}}} \quad (16)$$

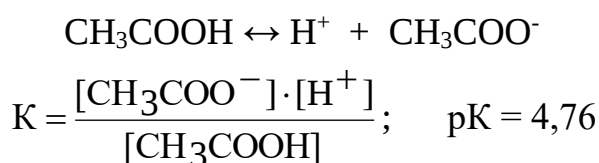
Якщо буферний розчин є сумішшю розчинів солей багато основних кислот різного ступеня заміщення, то pH розраховують за формулою:

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = \text{pK}_a - \lg \frac{c_{\text{кисл}}}{c_{\text{солі}}} \quad (17)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 14. Розрахувати pH ацетатної буферної суміші, яка містить у 1 дм³ розчину 0,2 моль кожного з компонентів. Як зміниться pH при додаванні до 1 дм³ суміші: а) 0,01 моль HCl; б) 0,01 моль NaOH.

Розв'язок. До складу ацетатної буферної суміші входить ацетатна кислота і натрію ацетат. Ацетатна кислота – слабкий електроліт і дисоціює за рівнянням:



Натрію ацетат – сильний електроліт, дисоціює повністю:



У присутності однойменних іонів рівновага дуже зміщена ліворуч, тобто концентрацію кислоти можна прийняти рівною її початковій концентрації:

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = c_{\text{кислоти}}.$$

Унаслідок того, що ацетатна кислота – слабкий електроліт, то майже всі CH_3COO^- - іони утворюються внаслідок дисоціації солі:

$$[\text{CH}_3\text{COO}^-] = c_{\text{солі}}.$$

Визначаємо $[\text{H}^+]$:

$$[\text{H}^+] = K \cdot \frac{[\text{CH}_3\text{COOH}]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]}$$

Визначаємо pH ацетатної буферної суміші за формулою (15):

$$c_{\text{кисл}} = c_{\text{солі}} = 0,2 \text{ моль/дм}^3;$$

$$pH_1 = 4,76 - \lg \frac{0,2}{0,2} = 4,76$$

Якщо до 1 дм³ суміші додати 0,01 моль HCl, то внаслідок реакції між HCl і CH₃COONa концентрація ацетатної кислоти зросте до 0,21 моль/дм³, а концентрація CH₃COO⁻ -іонів знизиться до 0,19 моль/дм³.

$$\text{Тоді: } pH_2 = 4,76 - \lg \frac{0,21}{0,19} = 4,72$$

Якщо до 1 дм³ суміші додати 0,01 моль NaOH, то внаслідок взаємодії NaOH і CH₃COOH концентрація [CH₃COO⁻]- іонів зросте до 0,21 моль/дм³, а концентрація ацетатної кислоти знизиться до 0,19 моль/дм³.

$$\text{Тоді: } pH_3 = 4,76 - \lg \frac{0,19}{0,21} = 4,80$$

Відповідь: pH₁ = 4,76; pH₂ = 4,72; pH₃ = 4,80.

Приклад 15. Розрахувати буферну ємність ацетатної буферної суміші, яка містить у 1 л розчину по 1 молю кожного з компонентів.

Розв'язок. Кількісно буферну ємність визначають як кількість речовини сильної кислоти або основи, яку необхідно додати до 1 л розчину, щоб змінити його рН на одиницю.

За даними задачі співвідношення $c_{\text{кисл}}/c_{\text{солі}}=1$, тому $pH=pK=4,76$.

1) Щоб зменшити рН на одиницю, тобто збільшити концентрацію гідроген-іонів в 10 разів, необхідно додати до розчину таку кількість моль кислоти, щоб співвідношення $c_{\text{кисл}}/c_{\text{солі}}=10$.

При збільшенні кількості моль кислоти на x , кількість моль солі зменшується також на x . Таким чином, можна скласти рівняння:

$$\frac{1+x}{1-x} = 10; \text{ звідки } x = 9:11 = 0,818 \text{ моль/л.}$$

Для перевірки правильності нашого рішення розрахуємо концентрацію гідроген-іонів та рН розчину після додавання 0,818 моль хлоридної кислоти:

$$[H^+] = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{1,818}{0,182} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л, } pH=3,76; \Delta pH=1.$$

2) Розрахуємо кількість лугу для збільшення рН розчину на одиницю. У цьому випадку до розчину треба додати стільки моль лугу, щоб співвідношення $c_{\text{кисл}}/c_{\text{солі}} = 0,1$. Додавання y моль лугу зменшить кількість кислоти, та збільшить кількість солі у суміші на y моль:

$$\frac{1-y}{1+y} = 0,1; \text{ звідки } y = 0,818 \text{ моль/л.}$$

При перевірці рішення знаходимо:

$$[H^+] = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{0,182}{1,818} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л, } pH=5,76; \Delta pH=1.$$

Відповідь: Буферна ємність 1 л даної ацетатної буферної суміші складає 0,818 моль хлоридної кислоти та 0,818 моль лугу.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1-20. Визначити $[H^+]$ і pH буферного розчину. Написати рівняння реакцій взаємодії його з невеликими кількостями сильних кислот і основ. Пояснити дію буферного розчину по регулюванню $[H^+]$ і $[OH^-]$ у водному розчині при додаванні кислот і лугів.

1. Суміш рівних об'ємів 0,5 М розчину KH_2PO_4 і 0,5 М розчину K_2HPO_4 .
2. Суміш рівних об'ємів 0,1 М розчину $HCOOH$ і 1 н. розчину $HCOONa$.
3. Суміш рівних об'ємів 0,5 М розчину CH_3COOH і 0,5 М розчину CH_3COONa .
4. Суміш рівних об'ємів 1 М розчину $HCOOH$ і 1 М розчину $HCOOK$.
5. Суміш рівних об'ємів 0,5 М розчину NH_4OH і 0,5 М розчину NH_4Cl .
6. Суміш рівних об'ємів 1 М розчину KH_2PO_4 і 1 М розчину K_2HPO_4 .
7. Суміш 25 cm^3 0,2 М розчину CH_3COOH і 15 cm^3 0,1 М розчину CH_3COONa .
8. Розчину, який утворюється при додаванні 23 г $HCOOH$ і 21 г $HCOOK$ до 2 dm^3 води.
9. Суміш 100 cm^3 0,0375 М розчину CH_3COOH і 0,102 г CH_3COONa .
10. Суміш 50 cm^3 0,1 М розчину KH_2PO_4 і 25 cm^3 0,2 М розчину K_2HPO_4 .
11. Суміш 30 cm^3 0,1 М розчину Na_2CO_3 і 15 cm^3 0,1 М розчину $NaHCO_3$.
12. Суміш 70 cm^3 0,2 М розчину KH_2Cit і 30 cm^3 0,1 М розчину K_2HCit , де Cit^{3-} - аніон лимонної кислоти.
13. Суміш 30 cm^3 0,1 М розчину оцтової кислоти і 50 cm^3 0,3 М розчину ацетату натрію.
14. Суміш 25 cm^3 0,03 М розчину фтороводневої кислоти і 40 cm^3 0,2 М розчину калію фториду.
15. Суміш 40 cm^3 0,2 М розчину ціанової кислоти і 10 cm^3 0,02 М розчину ціанату натрію.
16. Суміш 20 cm^3 0,05 М розчину азотистої кислоти і 40 cm^3 0,02 М розчину натрію нітриту.
17. Суміш 10 cm^3 0,2 М розчину пропіонової кислоти і 70 cm^3 2 М розчину пропіонату калію.
18. Суміш 50 cm^3 0,5 М розчину монохлороцтової кислоти і 200 cm^3 0,5 М розчину монохлороцетату калію.
19. Суміш рівних об'ємів 1 М розчинів $HCOOH$ і $HCOOK$.
20. Суміш рівних об'ємів 1 М водних розчинів амоніаку і хлористого амонію.

1.4. Рівноваги в розчинах солей, які гідролізують

Гідроліз – це взаємодія іонів розчиненої речовини з водою, що може приводити до зміни значення pH розчину.

Реакції гідролізу використовуються у якісному аналізі як характерні реакції відкриття ряду катіонів і аніонів, для регулювання рН і рОН розчинів тощо.

Залежно від складу солей є такі типи реакцій гідролізу:

- гідроліз солі, яка при дисоціації у водному розчині утворює катіон сильної основи та аніон слабкої кислоти (гідроліз за аніоном);
- гідроліз солі, яка при дисоціації у водному розчині утворює катіон слабкої основи та аніон сильної кислоти (гідроліз за катіоном);
- гідроліз солі, яка при дисоціації у водному розчині утворює катіон слабкої основи та аніон слабкої кислоти (гідроліз за катіоном і аніоном).

Сіль, яка при дисоціації у водному розчині утворює катіон сильної основи та аніон сильної кислоти, не піддається гідролізу.

Кількісно гідроліз, як оборотний процес, можна характеризувати двома величинами: ступенем (h) і константою гідролізу (K_r).

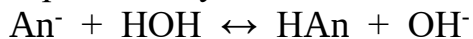
Ступінь гідролізу (h) - це відношення молярної концентрації солі, що гідролізувала, до загальної молярної концентрації солі у цьому розчині:

$$h = \frac{c_{\text{гідр}}}{c_{\text{заг}}} \quad (18)$$

Константою гідролізу (K_r) називається відношення добутку молярних концентрацій речовин продуктів гідролізу до молярної концентрації речовин негідролізованих іонів солі у розчині.

Перший тип гідролізу солей

Загальна форма запису рівняння реакції гідролізу солі типу Kt^+An^- , коли гідроліз відбувається за аніоном:



Константу гідролізу та ступінь гідролізу розраховують за формулами:

$$K_r = \frac{K_w}{K_a} \quad (19)$$

$$h = \sqrt{\frac{K_r}{c_{\text{солі}}}} = \sqrt{\frac{K_w}{K_a \cdot c_{\text{солі}}}} \quad (20)$$

$$pH = 1/2 pK_w + 1/2 pK_a + 1/2 \lg c_{\text{солі}} \quad (21)$$

Другий тип гідролізу солей

Загальна форма запису рівняння реакції гідролізу солі типу Kt^+An^- , коли гідроліз відбувається за катіоном:



Константу гідролізу та ступінь гідролізу розраховують за формулами:

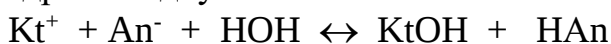
$$K_r = \frac{K_w}{K_b} \quad (22)$$

$$h = \sqrt{\frac{K_r}{c_{\text{соли}}}} = \sqrt{\frac{K_w}{K_b \cdot c_{\text{соли}}}} \quad (23)$$

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_w - \frac{1}{2} \text{p}K_b - \frac{1}{2} \lg c_{\text{соли}} \quad (24)$$

Третій тип гідролізу солей

Загальна форма запису рівняння реакції гідролізу солі типу Kt^+An^- , коли гідроліз відбувається за катіоном і аніоном:



Константу гідролізу та ступінь гідролізу розраховують за формулами:

$$K_{\bar{a}} = \frac{K_w}{K_a \cdot K_b} \quad (25)$$

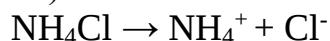
$$\frac{h}{1-h} = \sqrt{K_r} \quad (26)$$

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_w + \frac{1}{2} \text{p}K_a - \frac{1}{2} \text{p}K_b \quad (27)$$

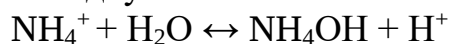
Приклади розв'язання задач

Приклад 16. Розрахувати константу гідролізу і pH розчину амонію хлориду з молярною концентрацією 0,1 моль/л.

Розв'язок. NH_4Cl – сіль, яка утворена катіоном слабкої основи ($K_{\text{осн}}=1,76 \cdot 10^{-5}$) і аніоном сильної кислоти.



Гідроліз відбувається за катіоном:



Для солей такого типу скористаємося рівнянням (22):

$$K_r = \frac{K_w}{K_{\text{NH}_4\text{OH}}} = \frac{10^{-14}}{1,76 \cdot 10^{-5}} = 5,68 \cdot 10^{-10}$$

Розрахуємо ступінь гідролізу солі (23):

$$h = \sqrt{\frac{K_r}{C_{\text{NH}_4\text{Cl}}}} = \sqrt{\frac{5,68 \cdot 10^{-10}}{10^{-1}}} = 7,4 \cdot 10^{-5}$$

Значення pH розрахуємо за формулою (24):

$$\text{pH} = 7 - \frac{1}{2} \text{p}K_b - \frac{1}{2} \lg c_{\text{соли}}$$

Підставимо числові значення величин у рівняння:

$$\text{pH} = 7 - 2,38 + 0,5 = 5,12$$

Відповідь: $K_r = 5,68 \cdot 10^{-10}$; $\text{pH} = 5,12$.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид амонію, ортофосфат натрію, ацетат заліза (III). Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину амонію хлориду з молярною концентрацією 0,01 моль/л.
2. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: карбонат амонію, хлорид олова (II), ацетат натрію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату натрію з молярною концентрацією 0,1 моль/л.
3. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид амонію, сульфід натрію, ацетат заліза, хлорид калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату заліза з молярною концентрацією 0,12 моль/л.
4. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: карбонат амонію, хлорид олова, ортофосфат натрію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ортофосфату натрію з молярною концентрацією 0,05 моль/л.
5. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид натрію, нітрат цинку, алюмінат натрію, ціанід амонію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ціаніду амонію з молярною концентрацією 0,3 моль/л.
6. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: карбонат натрію, сульфат цинку, ацетат алюмінію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату алюмінію з молярною концентрацією 0,2 моль/л.
7. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: нітрат барію, ацетат калію, сульфат амонію, сульфат міді. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину сульфату амонію з молярною концентрацією 0,01 моль/л.
8. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: сульфід амонію, хлорид свинцю, ацетат калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату калію з молярною концентрацією 0,02 моль/л.
9. Складіть молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: карбонат натрію, хлорид заліза (III), ацетат амонію, нітрит калію. Яка реакція

розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину нітриту калію з молярною концентрацією 0,001 моль/л.

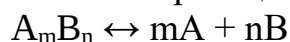
10. Складіть молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: нітрат барію, ацетат кальцію, сульфід амонію, сульфат міді. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату кальцію з молярною концентрацією 0,03 моль/л.
11. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: сульфід калію, нітрит натрію, карбонат калію, ацетат калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину сульфиду калію з молярною концентрацією 0,009 моль/л.
12. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: сульфід амонію, нітрат алюмінію, карбонат кальцію, нітрат свинцю. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину нітрату свинцю з молярною концентрацією 0,01 моль/л.
13. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид алюмінію, фосфат калію, сульфід натрію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз наведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину сульфиду натрію з молярною концентрацією 0,001 моль/л.
14. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид олова, сульфід натрію, сульфат калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату натрію з молярною концентрацією 0,015 моль/л.
15. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: нітрат натрію, хлорид сурми, сульфід калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату кальцію з молярною концентрацією 0,5 моль/л.
16. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид заліза, карбонат натрію, нітрат калію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину хлориду заліза з молярною концентрацією 0,005 моль/л.
17. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: нітрат натрію, ацетат алюмінію, хлорид амонію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату амонію з молярною концентрацією 0,003 моль/л.

18. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: хлорид вісмуту, фосфат натрію, сульфід натрію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину фосфату натрію з молярною концентрацією 0,01 моль/л.
19. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: карбонат калію, нітрат свинцю, хлорид натрію. Яка реакція розчинів цих сполук? Як знизити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину ацетату натрію з молярною концентрацією 0,004 моль/л.
20. Скласти молекулярні та іонні рівняння гідролізу солей: сульфід амонію, нітрит натрію, хлорид заліза. Яка реакція розчинів цих сполук? Як зменшити чи підсилити гідроліз приведених сполук? Розрахувати константу гідролізу і рН розчину нітриту натрію з молярною концентрацією 0,04 моль/л.

1.5. Рівноваги в гетерогенних системах

Особливістю гетерогенних хімічних процесів є те, що вони є рівноважними і тверда фаза не входить у вираз константи рівноваги реакцій.

Константа рівноваги узагальненої реакції осадження-розчинення



має вигляд:

$$K_S^o = a_A^m \cdot a_B^n = D P^o \quad (28)$$

Добуток розчинності визначається природою речовини та полярністю розчинника і залежить від температури. Значення цієї важливої аналітичної константи для деяких малорозчинних електролітів за температури 25 °C наведено у табл. 7.

Умови утворення і випадання осаду під час проведення аналітичних реакцій: ***осад малорозчинного сильного електроліту утворюється тоді, коли після змішування розчинів реагентів добуток молярних концентрацій речовин катіонів і аніонів буде більшим, ніж ДР осаду: $ID > DP$ осаду.***

Наприклад, осад барій сульфату буде випадати тоді, коли $[Ba^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] > DP_{BaSO_4}$ – розчин пересичений, переважає процес осадження.

Якщо $[Ba^{2+}][SO_4^{2-}] = DP_{BaSO_4}$ – динамічна рівновага.

І якщо $[Ba^{2+}][SO_4^{2-}] < DP_{BaSO_4}$ – розчин ненасичений, переважає процес розчинення осаду.

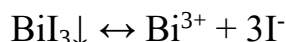
За величиною ДР можна визначити розчинність малорозчинних електролітів у воді та в розчинах, що містять інші електроліти. Із загального виразу ДР (рівняння 28) для речовини $A_m B_n$ дістають формулу для визначення розчинності S , вираженої в молях на дециметр кубічний:

$$S = \sqrt[m+n]{\frac{K_s}{m^m \cdot n^n}} = \sqrt[m+n]{\frac{DP}{m^m \cdot n^n}} \quad (29)$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 17. За значенням добутку розчинності (ДР) розрахувати розчинність BiI_3 (г/л) у воді і розчині KI з молярною концентрацією 0,01 моль/л.

Розв'язок. У насиченому розчині бісмут (III) йодиду встановлюється рівновага:



Припустимо, що в 1 л насиченого розчину міститься S моль BiI_3 . Рівноважні концентрації іонів у розчині відповідно складають:

$$[\text{Bi}^{3+}] = S, \quad [\text{I}^-] = 3S.$$

Добуток розчинності $DP(\text{BiI}_3) = 8,1 \cdot 10^{-19} = [\text{Bi}^{3+}] \cdot [\text{I}^-]^3$

Підставимо значення рівноважних концентрацій і одержимо:

$$DP(\text{BiI}_3) = S \cdot (3S)^3 = 27S^4$$

Отже, S дорівнює:

$$S = \sqrt[4]{\frac{DP(\text{BiI}_3)}{27}} = \sqrt[4]{\frac{8,1 \cdot 10^{-19}}{27}} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Розчинність $P(\text{BiI}_3)$, г/л, дорівнює:

$$P(\text{BiI}_3) = S \cdot M(\text{BiI}_3) = 1,32 \cdot 10^{-5} \cdot 589,68 = 7,78 \cdot 10^{-3} \text{ г/л.}$$

2) Для визначення розчинності BiI_3 в розчині KI , який має концентрацію $c(\text{KI}) = 0,01$ моль/л, необхідно врахувати зміщення рівноваги реакції розчинення BiI_3 ліворуч. Позначимо кількість BiI_3 в 1 л його насиченого розчину – X . Рівноважна концентрація йодид-іонів $[\text{I}^-]$ обумовлена дисоціацією сильного електроліту KI і розчинністю осаду BiI_3 :

$$[\text{I}^-] = c(\text{KI}) + 3X.$$

Тоді рівняння (3) перетворюється:

$$DP(\text{BiI}_3) = X \cdot (c(\text{KI}) + 3X)^3 \quad (\text{i})$$

Припустимо, що $c(\text{KI})$ значно перевищує $3X(\text{BiI}_3)$, тоді $(c(\text{KI}) + 3X) \approx c(\text{KI})$.

Рівняння (i) спрощується:

$$DP(\text{BiI}_3) = X \cdot c^3(\text{KI}) \quad (\text{ii})$$

Отже

$$X = \frac{DP(\text{BiI}_3)}{c^3(\text{KI})} \quad (\text{iii})$$

Підставимо в рівняння (iii) числові значення і одержимо:

$$X = \frac{8,1 \cdot 10^{-19}}{(0,01)^3} = 8,1 \cdot 10^{-13} \text{ моль/л.}$$

Розчинність в г/л дорівнює: $8,1 \cdot 10^{-13} \cdot 589,68 = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ г/л.}$

Відповідь: Розчинність солі BiI_3 у воді $7,78 \cdot 10^{-3} \text{ г/л}$, а в 0,01 М розчині KI – $4,77 \cdot 10^{-10} \text{ г/л}$.

Приклад 18. За величиною добутку розчинності BiI_3 розрахувати, яка маса осаду BiI_3 буде втрачена за рахунок розчинності при промиванні його 250 мл дистильованої води.

Розв'язок. За даними попередньої задачі, розчинність BiI_3 у воді $P(\text{BiI}_3) = 7,78 \cdot 10^{-3}$ г/л. Для промивання осаду використовують 250 мл води, тоді маса BiI_3 , втрачена за рахунок розчинності, дорівнює:

$$Y = 7,78 \cdot 10^{-3} \cdot 250 : 1000 = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Відповідь: За рахунок розчинності при промиванні буде втрачено $1,9 \cdot 10^{-3}$ г осаду.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Розрахувати скільки грамів аргентум хлориду розчиниться: а) у 500 см^3 води; б) у 100 см^3 0,1 М розчину хлориду калію.
2. Чи випаде осад плюмбум хлориду ($\text{ДР} = 2,4 \cdot 10^{-4}$) при змішуванні 0,5 н. розчину плюмбум нітрату з рівним об'ємом: а) 0,05 н. розчину хлоридної кислоти; б) 0,5 н. розчину хлоридної кислоти.
3. Розрахувати розчинність барію хромату в г/дм^3 у воді та у 0,1 М розчині K_2CrO_4 .
4. Розрахувати скільки грамів PbSO_4 залишиться в розчині, якщо розчинити 0,284 г Na_2SO_4 у 200 см^3 насиченого розчину PbSO_4 .
5. Розрахувати добуток розчинності аргентум йодиду, якщо його розчинність при 25 °С дорівнює $2,865 \cdot 10^{-6}$ г/дм^3 .
6. Розрахувати розчинність CaC_2O_4 у грамах на літр: а) у воді, б) у розчині, що містить у 100 см^3 0,12 г $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$.
7. У скільки разів розчинність BaSO_4 у 0,01 М розчині K_2SO_4 менша за його розчинність у чистій воді?
8. Розрахувати скільки грамів AgCl може розчинитися: а) у 200 см^3 води; б) у 200 см^3 0,01 М розчину NaCl .
9. У скільки разів розчинність CaC_2O_4 ($\text{ДР} = 2,57 \cdot 10^{-9}$) у 0,01 М розчині оксалату амонію менша у порівнянні з його розчинністю в чистій воді?
10. Чи утвориться осад CdS при пропусканні сірководню крізь насичений розчин карбонату кадмію, якщо ДР CdCO_3 дорівнює $2,5 \cdot 10^{-14}$?
11. Чи випаде осад MnS з 0,001 М розчину $\text{Mn(NO}_3)_2$, якщо створити концентрацію сульфід-іонів у цьому розчині, рівну 10^{-15} моль/ дм^3 ? Відповідь підтвердити відповідним розрахунком.
12. Чи випаде осад CaCO_3 при змішуванні рівних об'ємів 0,001 М розчинів CaCl_2 і Na_2CO_3 ? Відповідь підтвердити відповідним розрахунком.
13. Розрахувати скільки грамів хромату свинцю може розчинитися: а) у 500 см^3 води; б) у 500 см^3 0,01 М розчину хромату натрію.
14. За даними про добутки розчинності плюмбум сульфату і плюмбум йодиду обчислити їх розчинність у моль/ дм^3 і г/дм^3 . Чому сіль з меншим значенням ДР має більшу розчинність?

15. У скільки разів розчинність оксалату кальцію ($DP=2,57 \cdot 10^{-9}$) у 0,01М розчині оксалату амонію менша за його розчинність у воді?
16. Обчислити розчинність плумбум хромату в г/дм³: а) у воді; б) у 0,1М розчині хромату калію.
17. Розчинність кальцію карбонату дорівнює $1,3 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, а плумбум бромиду $2,7 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³. Знайдіть добутки розчинності цих солей.
18. Розрахувати розчинність CaC_2O_4 у г/дм³: а) у воді; б) у розчині, що містить у 100 см³ 0,124 г $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$.
19. У скільки разів розчинність BaSO_4 у 0,01 М розчині K_2SO_4 менша за його розчинність в чистій воді?
20. Визначити концентрацію Ag^+ і $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ у насиченому розчині аргентум оксалату за даними про добуток розчинності $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

1.6. Рівноваги в окисно – відновних реакціях

Окисно – відновні реакції мають велике значення в практиці аналітичної хімії. Зокрема, вони використовуються в якісному аналізі для виявлення та відокремлення окремих катіонів і аніонів, розчинення різних речовин чи для маскуванню іонів.

Кількісне трактування закономірностей окисно–відновних реакцій у розчинах електролітів ґрунтується на обчисленні стандартної зміни енергії Гіббса реакції. Значення енергії Гіббса є критерієм можливості і глибини проходження окисно-відновної реакції в заданому напрямі. За величиною енергії Гіббса можна зробити висновок про напрям проходження окисно-відновних реакцій.

Якщо $\Delta G < 0$, то реакція самочинно проходить тільки в прямому напрямі; якщо $\Delta G > 0$ – у зворотному напрямі; при $\Delta G=0$ – система перебуває в стані рівноваги.

Зв'язок ΔG з константою рівноваги виражається рівнянням:

$$\Delta G^0 = - RT \lg K_p.$$

Окисно-відновні властивості речовини визначаються за їх хімічною активністю. Остання виражається через окисно-відновний (редокс) потенціал, який є стандартний $E^0_{\text{Ox/Red}}$ і реальний $E_{\text{Ox/Red}}$. Реальний окисно-відновний потенціал виражається рівнянням Нернста:

$$E_{\text{Ox/Red}} = E^0_{\text{Ox/Red}} + \frac{RT}{nF} \cdot \lg \frac{c(\text{Ox})}{c(\text{Red})} \quad (30)$$

Значення стандартних окисно-відновних потенціалів дозволяють зробити висновок про можливість проходження реакції за стандартних і реальних умов: якщо різниця стандартних або реальних окисно-відновних потенціалів(електрорушійна сила – ЕРС) вихідних речовин реакції позитивна, то можливе проходження реакції в напрямі утворення продуктів реакції.

$$\text{ЕРС} = E_{\text{Ox}}^0 - E_{\text{Red}}^0 \quad (31)$$

Константа рівноваги окисно-відновної реакції визначається за формулою:

$$\lg K = \frac{(E_{\text{Ox}}^{\circ} - E_{\text{Red}}^{\circ}) \cdot n}{0,059} \quad (32)$$

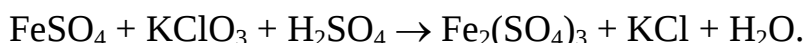
Редокс пара з більшим стандартним окисно-відновним потенціалом є окисником по відношенню до редокс пари з меншим стандартним окисно-відновним потенціалом. Наприклад, пара $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ по відношенню до пари $\text{Br}_2/2\text{Br}^-$ буде окисником, оскільки $E^{\circ}(\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}) = +1,51 \text{ В}$, а $E^{\circ}(\text{Br}_2/2\text{Br}^-) = +1,087 \text{ В}$.

Приклади розв'язання задач

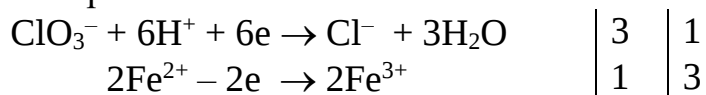
Приклад 19. Скласти електронно-іонні схеми і закінчити рівняння реакції окиснення ферум (II) сульфату бертолетовою сіллю у кислотному середовищі.

Розв'язок.

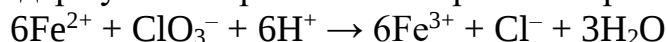
1. Складаємо схему реакції, вказавши формули вихідних речовин та продуктів:



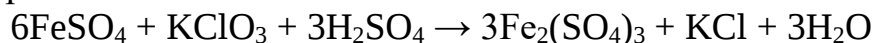
2. Записуємо схеми напівреакцій процесу відновлення і окиснення, враховуючи те, що в розчині сильні електроліти перебувають в стані іонів, і збалансовуємо електрони:



3. Додаємо ліву і праву частини напівреакцій, і помноживши друге рівняння на число 3, одержуємо скорочене іонне рівняння реакції:

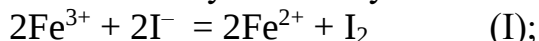


Якщо потрібно записати це рівняння в молекулярній формі, то дописуємо відповідне число катіонів та аніонів і перевіряємо число атомів в обох частинах рівняння:

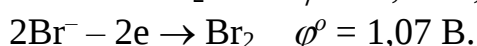
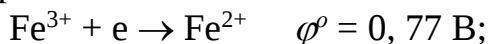


Приклад 20. Пояснити, чому за стандартних умов іони Fe(III) можуть окиснити іони Йоду I^- , проте не окиснюють іонів Брому Br^- .

Розв'язок. Записуємо схему можливих реакцій між цими іонами:



Знаходимо значення стандартних окисно-відновних потенціалів напівреакцій окиснення і відновлення (див. табл. 8 у додатках):



Обчислюємо значення ЕРС першої і другої реакцій за рівнянням (31):

$$E^{\circ}_{(I)} = 0,77 - 0,54 = 0,23 \text{ (В)};$$

$$E^{\circ}_{(II)} = 0,77 - 1,07 = -0,30 \text{ (В)}.$$

На основі одержаних даних робимо висновок. У першій реакції значення $E^{\circ} > 0$, отже вона буде відбуватися. Електрорушійна сила другої реакції має від'ємне значення $E^{\circ} < 0$. Це вказує на те, що іони Fe^{3+} у складі будь-якої солі не здатні окиснювати бромід-іони до вільного броду.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1-20. Скласти рівняння окисно-відновних реакцій. Вкажіть окислювач і відновник. Виписати табличні значення величин стандартних потенціалів відповідних окисно-відновних пар, розрахувати ЕРС та визначити напрям перебігу реакцій.

1. а) $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ б) $\text{Al} + \text{KNO}_3 + \text{KOH} \rightarrow$ в) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$	11. а) $\text{MnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ б) $\text{KI} + \text{Cl}_2 \rightarrow$ в) $\text{Ag}_2\text{S} + \text{HNO}_3 \rightarrow$
2. а) $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 + \text{PbO}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ б) $\text{K}_2\text{S} + \text{K}_2\text{SO}_3 + \text{HCl} \rightarrow$ в) $\text{NaNO}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$	12. а) $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ б) $\text{HgS} + \text{HNO}_3 + \text{HCl} \rightarrow$ в) $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$
3. а) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{I}_2 \rightarrow$ б) $\text{PbS} + \text{HNO}_3 \rightarrow$ в) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{NaBiO}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow$	13. а) $\text{Cu} + \text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow$ б) $\text{KBr} + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ в) $\text{K}_2\text{S} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
4. а) $\text{HgS} + \text{HNO}_3 + \text{HCl} \rightarrow$ б) $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ в) $\text{Bi}_2\text{S}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow$	14. а) $\text{CoCl}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow$ б) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{I}_2 \rightarrow$ в) $\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$
5. а) $\text{Ag}_2\text{S} + \text{HNO}_3 \rightarrow$ б) $\text{CoS} + \text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow$ в) $\text{Co}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$	15. а) $\text{KI} + \text{CuSO}_4 \rightarrow$ б) $\text{MnO}_2 + \text{HCl} \text{ (конц.)} \rightarrow$ в) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$
6. а) $\text{Na}_2\text{S} + \text{NaNO}_2 + \text{HCl} \rightarrow$ б) $\text{SnCl}_2 + \text{HgCl}_2 \rightarrow$ в) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{PbO}_2 + \text{HNO}_3 \rightarrow$	16. а) $\text{KMnO}_4 + \text{KBr} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ б) $\text{Na}_2\text{SnO}_2 + \text{Bi}(\text{OH})_3 \rightarrow$ в) $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 + \text{PbO}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$
7. а) $\text{Na}_2\text{SnO}_2 + \text{Bi}(\text{OH})_3 \rightarrow$ б) $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ в) $\text{Na}_2\text{S} + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$	17. а) $\text{K}_2\text{S} + \text{K}_2\text{SO}_3 + \text{HCl} \rightarrow$ б) $\text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ в) $\text{NaNO}_2 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
8. а) $\text{NaCrO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ б) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ в) $\text{CdS} + \text{HNO}_3 \rightarrow$	18. а) $\text{Ni}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ б) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{I}_2 \rightarrow$ в) $\text{PbS} + \text{HNO}_3 \rightarrow$
9. а) $\text{FeSO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ б) $\text{Mn}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow$ в) $\text{CoS} + \text{HNO}_3 \rightarrow$	19. а) $\text{Zn} + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{HCl} \rightarrow$ б) $\text{Mn}(\text{NO}_3)_3 + \text{NaBiO}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow$ в) $\text{NaNO}_2 + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$
10. а) $\text{MnS} + \text{HNO}_3 \rightarrow$ б) $\text{CrCl}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH} \rightarrow$ в) $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$	20. а) $\text{MnO}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ б) $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Br}_2 + \text{NaOH} \rightarrow$ в) $\text{NiS} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} \rightarrow$

2. Кількісний аналіз

2.1. Методі нейтралізації (кисотно-основне титрування)

Усі обчислення в титриметричному аналізі проводять на основі **закону еквівалентів**, який виражають рівнянням:

$$\frac{m(X)}{m(T)} = \frac{M_E(X)}{M_E(T)} \quad (33)$$

і формулюють так: *маси реагуючих речовин прямо пропорційні молярним масам їх еквівалентів*. За результатами титрування можна обчислити:

- 1) масу речовини у досліджуваному розчині;
- 2) молярну концентрацію еквівалента досліджуваного розчину і його титр;
- 3) масову частку чистої речовини у технічному препараті.

Обчислення за результатами прямого та замісного титрування

Якщо відомі молярна концентрація еквівалента речовини $c_H(X)$ і об'єм розчину $V(X)$, то можна визначити кількість еквівалентів досліджуваної речовини $\nu_{екв}(X)$ за формулою:

$$\nu_{екв}(X) = \frac{c_H(X) \cdot V(X)}{1000} \quad (34)$$

Кількість еквівалентів титранту можна розрахувати за результатами титрування:

$$\nu_{екв}(T) = \frac{c_H(T) \cdot V(T)}{1000} \quad (35)$$

Згідно закону еквівалентів (див. рівняння 33) в точці еквівалентності кількості досліджуваної речовини та титранту рівні, тобто $\nu_{екв}(X) = \nu_{екв}(T)$. Тоді, поєднуючи рівняння 34 і 35, дістаємо основну розрахункову формулу для розрахунку результатів прямого титрування:

$$c_H(X) \cdot V(X) = c_H(T) \cdot V(T) \quad (36)$$

Рівняння 36 дозволяє обчислити концентрацію досліджуваного розчину за відом об'ємом:

$$c_H(X) = \frac{c_H(T) \cdot V(T)}{V(X)} \quad (37)$$

Обчислення маси речовини у досліджуваному розчині проводять за формулою:

$$m(X) = \frac{c_H(T) \cdot V(T)}{1000} \cdot M_E(X) \quad (38)$$

Якщо титрується частка розчину (аліквота), то для розрахунку маси речовини у розчині користуються рівнянням:

$$m(X) = \frac{c_H(T) \cdot V(T)}{1000} \cdot M_E(X) \cdot \frac{V_K}{V_I} \quad (39)$$

де V_K, V_I - об'єми колби і піпетки відповідно.

Масу досліджуваної речовини у розчині можна також розрахувати за умовним титром титранту $T(T/X)$:

$$m(X) = T(T/X) \cdot V(T) \quad (40)$$

Для обчислення масової частки чистої речовини у технічному препараті (у %) необхідно масу чистої речовини (рівняння 38, 39 або 40) віднести до маси технічного зразку $m_{\text{іаа}}$:

$$\omega(X) = \frac{m(X)}{m_{\text{нав}}} \cdot 100\% \quad (41)$$

Якщо необхідно провести розрахунки, пов'язані із розбавленням розчинів, то використовують рівняння 36. Зрозуміло, що при розбавленні кількість речовини не змінюється, тому

$$c_1 \cdot V_1 = c_2 \cdot V_2 \quad (42)$$

де c_1, V_1 - концентрація і об'єм розчину до розбавлення;

c_2, V_2 - концентрація і об'єм розчину після розбавлення.

Згідно методики замісного титрування, кількість речовини у досліджуваному розчині дорівнює кількості замісника, який визначається титруванням, тобто

$$\nu_{\text{екв}}(X) = \nu_{\text{екв}}(Z) = \nu_{\text{екв}}(T) \quad (43)$$

Останнє рівняння дозволяє прийти до висновку, що для розрахунків результатів замісного титрування можна використовувати формули для розрахунків прямого титрування.

Обчислення за результатами зворотного титрування

У методі зворотного титрування кількість еквівалентів досліджуваної речовини $\nu_{\text{ддд}}(\tilde{O})$ дорівнює різниці між кількістю еквівалентів основного (1) и допоміжного (2) робочих розчинів:

$$\nu_{\text{екв}}(X) = \nu_{\text{екв}}(1) - \nu_{\text{екв}}(2) \quad (44)$$

Тоді кількість досліджуваної речовини можна визначити за формулою:

$$\nu_{\text{екв}}(X) = \frac{c_H(1) \cdot V(1) - c_H(2) \cdot V(2)}{1000} \quad (45)$$

Концентрація речовини у досліджуваному розчині дорівнює:

$$c_H(X) = \frac{c_H(1) \cdot V(1) - c_H(2) \cdot V(2)}{V(X)} \quad (46)$$

Масу досліджуваної речовини у розчині розраховують за формулою:

$$m(X) = \frac{c_H(1) \cdot V(1) - c_H(2) \cdot V(2)}{1000} \cdot M_E(X) \quad (47)$$

Зазначимо, що вибір методики титрування обумовлений швидкістю і повнотою взаємодії досліджуваної речовини з титрантом.

Пам'ятка

Еквівалент та молярну масу еквівалента складних сполук обчислюють за формулами.

$$M_{E(\text{оксиду})} = \frac{M}{n \cdot B}, \quad f_{\text{екв}(\text{оксиду})} = \frac{1}{n \cdot B},$$

де: n – кількість атомів елемента;

B – валентність елемента.

Молярна маса еквівалента солі

$$M_{E(\text{солі})} = \frac{M}{n \cdot B}, \quad f_{\text{екв}(\text{солі})} = \frac{1}{n \cdot B},$$

де: n – кількість атомів елемента, що утворює катіон;

B – валентність катіону.

Еквівалент та молярна маса еквівалента основи

$$M_{E(\text{основи})} = \frac{M}{\text{кислотність основи}}, \quad f_{\text{екв}(\text{основи})} = \frac{1}{\text{кислотність основи}}.$$

Кислотність основи визначають числом гідроксогруп, здатних заміщуватися кислотним залишком. Еквівалент та молярна маса еквівалента кислоти

$$M_{E(\text{кислоти})} = \frac{M}{\text{основність кислоти}}, \quad f_{\text{екв}(\text{кислоти})} = \frac{1}{\text{основність кислоти}}.$$

Приклади розв'язання задач

Задача 21. Визначити масову відсоткову частку Na_2CO_3 в забрудненому препараті, якщо на титрування наважки 0,2016 г витрачено 20,16 мл (0,02016 л) 0,100 н розчину HCl .

Розв'язок. Згідно закону еквівалентів: $\nu(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \nu(\text{HCl})$.

Визначаємо масу Na_2CO_3 :

$$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = c(\text{HCl})V(\text{HCl})M_{E(\text{Na}_2\text{CO}_3)}; \quad M_{E(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = M(\text{Na}_2\text{CO}_3)/2;$$

$$M_{E(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = 106/2 = 53 \text{ г/моль.}$$

$$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 0,1 \cdot 0,02016 \cdot 53 = 0,1068 \text{ г.}$$

Визначаємо масову відсоткову частку Na_2CO_3 в забрудненому препараті:

$$\omega(\text{Na}_2\text{CO}_3) = m(\text{Na}_2\text{CO}_3) / m(\text{наважки})$$

$$\omega(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 0,1068 / 0,2016 = 0,53 = 53\%$$

Відповідь: масова відсоткова частка Na_2CO_3 дорівнює 53%

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. На титрування 20,0 см³ розчину NaOH витрачається 22,4 см³ 0,1н. HCl ($K=0,9325$). Скільки грамів NaOH міститься у 1000 см³ розчину?
2. У мірній колбі на 1000 см³ розчинена невідома кількість H_2SO_4 . На титрування 25,0 см³ розчину витрачається 30,45 см³ 0,1025 н. NaOH . Скільки грамів H_2SO_4 було введено до колби?
3. Наважка кальцинованої соди 0,1324 г розчинена в довільному об'ємі води. На титрування в присутності метилового жовтого гарячого витрачається 24,45 см³ HCl ($K=0,9850$ до 0,1 н.). Обчислити масову частку Na_2CO_3 у зразку.

4. На титрування розчину, отриманого розчиненням 3,1580 г їдкого калі, витрачається 27,45 см³ розчину HCl ($T_{\text{HCl/NaOH}} = 0,07862$). Обчислити масову частку KOH у зразку.
5. У мірній колбі на 1000 см³ розведено до мітки 50,0 см³ нітратної кислоти (густина 1,40). На титрування 20,0 см³ розчину KOH ($T_{\text{KOH/H}_2\text{SO}_4} = 0,04904$) витрачається 26,88 см³ розчину нітратної кислоти. Визначити вміст HNO₃ у вихідному розчині.
6. У мірну колбу на 500 см³ відміряли 25,00 см³ HCl (густина 1,19) і додали води до мітки. На титрування 20,0 см³ отриманого розчину витрачається 25,13 см³ розчину їдкого натру ($T = 0,001976$). Яка нормальність вихідного розчину кислоти і масова частка HCl?
7. Наважка кристалічної соди 7,2860 г розчинена в мірній колбі на 250 см³. На титрування 25,0 см³ отриманого розчину в присутності метилового жовтогарячого витрачається 22,75 см³ H₂SO₄ ($T = 0,0102$). Обчислити масову частку Na₂CO₃.
8. До 25,0 см³ розчину KOH невідомої концентрації додано 50,00 см³ розчину H₂SO₄ ($K = 0,95$ до 0,1 н.). На титрування надлишку кислоти витрачено 28,90 см³ розчину NaOH ($K = 0,8570$ до 0,1 н.). Яка нормальність розчину KOH?
9. До 20,0 см³ розчину HCl невідомої концентрації долито 25,00 см³ розчину KOH ($K = 0,8$ до 0,1 н.). Після цього розчин став сильно-лужним. Для зворотного титрування надлишку лугу довелося витратити 1,55 см³ розчину H₂SO₄ ($K = 1,20$ до 0,1 н.). Визначити концентрацію HCl.
10. Для визначення вмісту оксиду цинку 2,00 г цинкових білил розчинено в 100,0 см³ H₂SO₄ ($K = 0,982$ до 0,5 н.). На титрування надлишку кислоти витрачається 29,90 см³ розчину лугу ($K = 1,280$ до 0,1 н.). Обчислити масову частку ZnO у зразку.
11. Наважку кальциту 0,8679 г розчинено у 25 см³ 0,7873 н. HCl, на титрування надлишку кислоти витрачається 2,70 см³ 0,8818 н. NaOH. Обчислити масову частку CaCO₃ у зразку.
12. Для встановлення титру розчину HCl наважку безводної соди (х.ч.) 5,2060 г розчинено в мірній колбі на 500 см³. На титрування 25 см³ розчину витрачається 26,18 см³ стандартного розчину. Визначити: а) нормальність HCl; б) T_{HCl} ; в) $T_{\text{HCl/NaOH}}$.
13. Для встановлення титру розчину HCl узято 20,0 см³ розчину NaOH ($T = 0,03982$). Розчин розвели водою в мірній колбі на 200 см³ до мітки. На титрування 20,0 см³ отриманого розчину витрачається 18,95 см³ розчину HCl. Визначити: а) нормальність; б) T_{HCl} .
14. Для встановлення титру розчину KOH 5,9840 г H₂C₂O₄·2H₂O розчинили в мірній колбі на 1000 см³. На титрування 25,0 см³ отриманого розчину витрачається 26,32 см³ розчину KOH. Визначити: а) нормальність розчину KOH; б) $T_{\text{KOH/HCl}}$.
15. Для встановлення титру розчину NaOH 0,4826 г бурштинової кислоти розчинили в мірній колбі на 200 см³. На титрування 20,0 см³ отриманого

- розчину витрачається 21,05 см³ розчину NaOH. Визначити: а) нормальність NaOH; б) $T_{\text{NaOH/H}_2\text{SO}_4}$.
16. На титрування розчину, що містить 0,2584 г безводної соди, витрачається 21,35 см³ розчину H₂SO₄. Визначити: а) $T_{\text{H}_2\text{SO}_4}$; б) $T_{\text{H}_2\text{SO}_4/\text{NaOH}}$.
 17. Знайти нормальність розчину їдкого натру, якщо на титрування 16,78 см³ його витрачено 17,21 см³ розчину хлоридної кислоти з титром 0,003604.
 18. Наважка щавлевої кислоти масою 1 г розчинена в мірній колбі на 250 см³. При титруванні 50 см³ цього розчину витрачається 16,65 см³ розчину NaOH з $T=0,007518$. Скільки відсотків H₂C₂O₄·2H₂O містив зразок?
 19. Скільки відсотків сульфатної кислоти містить зразок, якщо наважка його 1 г розчинена в мірній колбі на 200 см³ і на нейтралізацію 25 см³ цього розчину витрачається 20,5 см³ 0,1 н. розчину NaOH?
 20. Скільки відсотків HCl містить технічна хлоридна кислота, якщо наважку її 10 г доведено в мірній колбі до 500 см³ та на нейтралізацію 50 см³ цього розчину витрачається 30,5 см³ 0,2 н. розчину NaOH з $K=0,9851$.

2.2. Метод окисно-відновного титрування

Основою розрахунків результатів окисно-відновного титрування є закон еквівалентів (рівняння 33-47).

Особливість розрахунків в методах окисно-відновного титрування полягає в визначенні молярної маси еквіваленту окисника або відновника.

Молярна маса еквівалента окисника або відновника відповідно дорівнює:

$$M_{\text{Е окис(відн)}} = \frac{M_{\text{Окис(відн)}}}{n},$$

де: n – число електронів, приєднаних або відданих одним молекулою окисника або відновника.

Приклади розв'язання задач

Приклад 22. Визначити масову відсоткову частку заліза в руді, якщо на титрування наважки 0,2000 г витрачено 22,00 мл розчину KMnO₄ з титром за залізом 0,00500 г/мл.

Розв'язок. Масову відсоткову частку заліза визначаємо за рівнянням:

$$\omega(\text{Fe}) = T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}} \cdot V_{\text{KMnO}_4} / m(\text{наважки});$$

$$\omega(\text{Fe}) = 0,005 \cdot 22 / 0,2 = 0,55 = 55\%$$

Відповідь: $\omega(\text{Fe}) = 55\%$

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Для встановлення титру розчину KMnO_4 приготували розчин з 1,5020 г $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в мірній колбі на 250 cm^3 . На титрування 25,0 cm^3 цього розчину витрачається в середньому 23,68 cm^3 розчину KMnO_4 . Визначити: а) T_{KMnO_4} ; б) $T_{\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4}$; в) нормальність KMnO_4 .
2. Наважка 1,250 г оксалату натрію (х.ч.) розчинена в мірній колбі на 250 cm^3 . На титрування аликвоти цього розчину витрачається 21,2 cm^3 розчину KMnO_4 . Визначити: а) нормальність KMnO_4 ; б) T_{KMnO_4} .
3. З 3,50 г кристалогідрату оксалату амонію (х.ч.), у мірній колбі на 500 cm^3 приготовлений вихідний розчин для встановлення титру робочого розчину KMnO_4 . На титрування 25,0 cm^3 вихідного розчину витрачено 24,90 cm^3 розчину KMnO_4 . Визначити: а) нормальність KMnO_4 ; б) T_{KMnO_4} ; в) $T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}}$.
4. На титрування розчину FeSO_4 витрачено 21,60 cm^3 розчину KMnO_4 ($T=0,002852$). Скільки грамів FeSO_4 міститься у розчині?
5. Наважка залізної руди після розчинення і відновлення відтитрована розчином KMnO_4 ; $T_{\text{KMnO}_4}=0,001842$; витрачений об'єм 42,35 cm^3 . Скільки грамів Fe_2O_3 міститься у наважці?
6. Наважку залізного дроту розчинено без доступу повітря в сульфатній кислоті. На титрування витрачено 35,40 cm^3 розчину калію перманганату ($T_{\text{KMnO}_4}=0,003082$). Скільки грамів Fe міститься у наважці?
7. Скільки грамів заліза в розчині, якщо на його титрування витрачається 26,65 cm^3 розчину KMnO_4 ($T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}}=0,003040$)?
8. Скільки грамів $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в розчині, якщо на його титрування витрачається 26,75 cm^3 розчину KMnO_4 ($T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}}=0,01122$)?
9. Наважка зразка технічного залізного купоросу масою 1,24 г розчинена в мірній колбі на 500 cm^3 . На титрування 25,0 cm^3 отриманого розчину витрачається 24,48 cm^3 0,0986 н. KMnO_4 . Обчислити масову частку $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в зразку.
10. Наважка зразка технічного сульфату натрію масою 2,6770 г розчинена в мірній колбі на 200 cm^3 . На титрування 20,0 cm^3 отриманого розчину витрачається 19,20 cm^3 розчину KMnO_4 . Обчислити масову частку у зразку: а) Na_2SO_3 ; б) $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, якщо $T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}}=0,005585$.
11. Наважка 0,3745 г зразка щавлевої кислоти розчинена та відтитрована перманганатом, якого витрачено на це 38,42 cm^3 ($T_{\text{KMnO}_4/\text{Fe}}=0,007982$). Обчислити масову частку $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ у зразку.
12. Наважка 0,4036 г зразка піролюзиту оброблена 50,0 cm^3 розчину щавлевої кислоти ($K=0,9750$ до 0,1 н.). Надлишок кислоти визначили зворотнім титруванням 15,90 cm^3 розчином KMnO_4 ($K=1,125$ до 0,1 н.). Обчислити масову частку MnO_2 у зразку.
13. Наважка зразку калію хлорату 0,1510 г розчинена й оброблена 100,0 cm^3 0,09852 н. $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$. На титрування надлишку оксалату натрію витрачено 48,60 cm^3 розчину KMnO_4 ($K=1,0640$ до 0,05 н.). Обчислити масову частку KClO_3 у зразку.

14. Наважку $K_2Cr_2O_7$ (х.ч.) 0,1180 г у кислому середовищі оброблено калію йодидом та відтитровано розчином тіосульфату натрію, якого витрачено 23,80 см³. Чому дорівнює титр розчину натрію тіосульфату?
15. Наважку натрію сульфідіду 0,9432 г розчинено в мірній колбі на 200 см³. На титрування аліквоти цього розчину витрачається 15,42 см³ розчину йоду ($K=1,2040$ до 0,1 н.). Обчислити масову частку Na_2S у зразку.
16. Наважка хлорного заліза 4,890 г розчинена в мірній колбі на 250 см³. 25,0 см³ цього розчину оброблено в кислому середовищі йодидом калію й відтитровано розчином тіосульфату натрію ($K=0,9230$ до 0,1 н.). Витрачено 32,10 см³ розчину титранту. Обчислити масову частку $FeCl_3$ у зразку.
17. Наважку сульфїту натрію 0,3596 г розчинено в довільному об'ємі води. Отриманий розчин відтитровано розчином йоду ($T=0,01142$), на що його витрачається 28,65 см³. Обчислити масову частку $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$ у зразку.
18. Наважку сульфїду натрію 0,0902 г розчинено. Отриманий розчин відтитровано 18,20 см³ розчином йоду. Обчислити масову частку Na_2S у зразку, якщо титр розчину йоду 0,001320.
19. Наважка $K_2Cr_2O_7$ (х.ч.) 1,2850 г розчинена в мірній колбі на 500 см³. Скільки см³ цього розчину піде на титрування 20,0 см³ 0,05 н. розчину солі Мору?
20. На титрування йоду, що виділився при обробці наважки PbO_2 йодидом калію, пішло 30,0 см³ розчину тіосульфату натрію з $T_{Na_2S_2O_3}=0,02482$ г/см³. Скільки грамів PbO_2 міститься у наважці?

2.3. Електрохімічні методи аналізу

Електрохімічні методи аналізу ґрунтуються на використанні залежності електричних параметрів (сили струму, напруги, рівноважних електродних потенціалів, електричної провідності, кількості електрики) від концентрації досліджуваної речовини в розчині.

Відповідно до рекомендацій ІЮПАК електрохімічні методи аналізу розподіляють на два види:

- методи без перебігу електрохімічних реакцій на електродах електрохімічної комірки (кондуктометрія при низьких та високих частотах);
- методи з перебігом електрохімічних реакцій на електродах електрохімічної комірки у відсутності струму (потенціометричні методи аналізу) і під дією струму (кулонометрія, вольтамперометрія).

У відповідності з цим усі електрохімічні методи аналізу класифікують таким чином:

- *кондуктометричні методи* аналізу, ґрунтуються на використанні залежності електричної провідності розчинів електролітів від їх концентрації;
- *потенціометричні методи*, ґрунтуються на використанні залежності електрорушійної сили (ЕРС) гальванічного елемента від концентрації речовини, що аналізують;

- *кулонометричні методи* аналізу, ґрунтуються на використанні залежності кількості електрики, що витрачено на проведення електрохімічної реакції з досліджуваною речовиною, від її концентрації в розчині;

- *вольтамперометричні методи* аналізу, ґрунтуються на використанні явища поляризації мікроелектрода і одержання поляризаційних кривих, які описують залежність сили струму від напруги. Одержана при цьому величина граничного дифузійного струму пропорційна концентрації досліджуваного іона.

Важливою перевагою вказаних електрохімічних методів є можливість використання в широкому інтервалі концентрацій ($1 \div 1 \cdot 10^{-9}$ моль/дм³), простота, автоматизація процесу аналізу.

Кондуктометрія. В основу кондуктометричного методу аналізу покладено залежність електричної провідності водних, змішаних та неводних розчинів електролітів від їх концентрації.

Електрична провідність розчину L виникає в результаті дисоціації розчиненої речовини і міграції іонів під дією зовнішнього джерела напруги і є величиною, оберненою електричному опору R (Ом)

$$L = \frac{1}{R} \quad (48)$$

У полі електричного струму іони, що рухаються в розчині, зазнають гальмуючої дії з боку молекул розчинника і протилежно заряджених іонів, які оточують їх, що зумовлює релаксаційний і електрофоретичний ефекти. Результатом такої гальмуючої дії є опір розчину електроліту R , який на ділянці l із перерізом S визначається співвідношенням:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (49)$$

Величина ρ , яка дорівнює опору куба з довжиною ребра 1 см, називається *питомим опором*, а величина, обернена їй, називається *питомою електричною провідністю* χ :

$$\chi = \frac{1}{\rho} \quad (50)$$

де:

χ - електрична провідність 1 см³ розчину, що знаходиться між електродами, площею 1 см² кожний, відстань між якими 1 см при напрузі електричного поля 1 В/см.

Більш зручною характеристикою розчину електроліту є його еквівалентна електрична провідність λ - провідність шару електроліту товщиною 1 см, який поміщається між електродами такої площі, щоб об'єм електроліту між ними містив 1 моль розчиненої речовини.

Питома і еквівалентна електричні провідності пов'язані між собою таким рівнянням:

$$\lambda = \frac{\chi \cdot 1000}{c} = \chi \cdot V, \quad (51)$$

де:

c - концентрація електроліту, моль/дм³;

V - об'єм розчину, в якому знаходиться 1 моль речовини, см³.

Пряма кондуктометрія побудована на вимірюванні питомої електропровідності χ розчинів електролітів в спеціальних кондуктометричних комірках. У певних межах концентрацій розчинів спостерігається прямо пропорційна залежність між χ і концентрацією електроліту, що використовується в кількісному аналізі.

Кондуктометричне титрування ґрунтується на використанні хімічної реакції, у результаті якої відбувається помітна зміна електричної провідності розчину. Електропровідність розчину змінюється в міру додавання титранту і фіксується графічно. Точку еквівалентності визначають перетинання лінійних ділянок кривої. На підставі отриманих даних розраховується вміст досліджуваної речовини в розчині.

Потенціометрія. Метод аналізу побудований на використанні залежності електрорушійної сили (ЕРС) електрохімічного кола від активності досліджуваного іона в розчині, що описується рівнянням Нернста:

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln a \quad (52)$$

де:

E_o - стандартна ЕРС електрохімічного кола;

n - заряд досліджуваного іона з відповідним знаком;

a - активність досліджуваного іона;

R - газова стала;

T - абсолютна температура;

F - стала Фарадея.

У потенціометричних методах аналізу використовуються електрохімічні кола, що складаються з двох електродів: індикаторного та електрода порівняння. *Індикаторним* називають електрод, потенціал якого залежить від концентрації досліджуваного розчину у відповідності з рівнянням Нернста. *Електродом порівняння* називають електрод, потенціал якого має стале значення.

Якщо обидва електроди занурені в досліджуваний розчин, то таке коло називається *колом без переносу*; якщо електрод порівняння з'єднаний з досліджуваним розчином через сольовий місток, то це – *коло з переносом*. Частіше використовують коло з переносом.

ЕРС кола E дорівнює різниці потенціалів електрода порівняння $E_{пор}$ і індикаторного $E_{інд}$:

$$E = E_{пор} - E_{інд} + E_d \quad (53)$$

де: E_d - дифузійний потенціал, що виникає на межі розділу двох рідинних фаз електрохімічного ланцюга. Як сольовий місток зазвичай використовують розчини солей з близькими значеннями рухливості

катиона та аніона: KCl , KNO_3 та ін. Місток знижує E_d практично до нуля.

Метод **прямої потенціометрії (іонометри)** ґрунтується на визначенні концентрації досліджуваного іона за величиною ЕРС електрохімічного кола з індикаторним електродом, селективним до цього іона.

Для визначення концентрацій за виміряною величиною ЕРС в іонометрії найбільш часто використовують два методи: метод градувального графіка та метод добавок.

А) Метод градувального графіка. Готують серію стандартних розчинів. Вимірюють ЕРС кола із стандартними розчинами і будують графік в координатах: ЕРС — $\lg c$. Потім вимірюють ЕРС кола з досліджуваним розчином і за графіком визначають його концентрацію.

Б) Метод добавок. Вимірюють ЕРС кола з досліджуваним розчином, а потім в нього вводять точно відомий об'єм (добавку) стандартного розчину та знову вимірюють ЕРС. За величиною зміни ЕРС розраховують концентрацію досліджуваного розчину:

$$c_x = \frac{\Delta c}{10^{\frac{\Delta E}{k}} - 1} \quad (54)$$

де:

Δc - приріст концентрації досліджуваного іона за рахунок введення стандартного розчину;

ΔE зміна ЕРС;

$k = \frac{2,303RT}{nF}$ - стала.

Метод прямої потенціометрії (іонометрії) характеризується експресністю, простотою виконання, відсутністю необхідності використання реагентів.

Потенціометричне титрування побудоване на індикації точки еквівалентності за зміною ЕРС потенціометричної комірки в ході титрування. Найбільш часто використовують такі види кривих титрування:

- *інтегральна крива титрування*, її будують в координатах: $E - V_T$ (об'єм титранту); точку еквівалентності визначають як середину стрибка титрування шляхом побудови дотичних (рис. 1а);

- *диференційна крива титрування*; її будують в координатах: $\Delta E / \Delta V - V_T$ (рис.1б); точка еквівалентності визначається за максимумом кривої титрування;

- *крива Грана*; її будують в координатах $\Delta V / \Delta E - V_T$; точка еквівалентності визначається за мінімумом кривої титрування (рис. 1в)

Потенціометричне титрування дозволяє проводити визначення в мутних та забарвлених розчинах. Точність його вище, ніж іонометрії.

З електрохімічних методів потенціометричні методи аналізу знаходять найбільш широке використання. Це зумовлено рядом переваг цього методу: усі потенціометричні методи аналізу можуть бути повністю автоматизовані від моменту взяття проби до видачі та запису результатів аналізу.

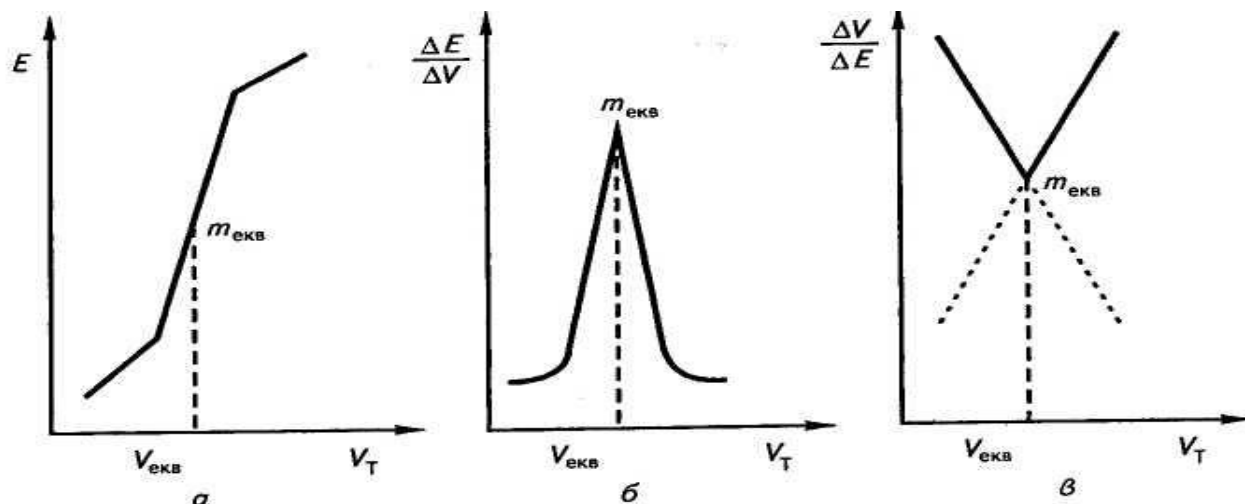


Рис. 1. Криві потенціометричного титрування:

а – інтегральна крива титрування; б – диференційна крива титрування; в – крива Грана.

Приклади розв'язання задач

Приклад 23. При титруванні 50 см³ суміші NaOH і NH₄OH 0,01М розчином HCl одержали наступні дані:

V(HCl), см ³	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
χ, См/см	6,3	5,41	4,52	3,62	3,71	4,79	5,85	6,93	9,00	12,08	15,13

Побудувати криву титрування і розрахувати концентрацію NaOH і NH₄OH у досліджуваному розчині (г/дм³).

Розв'язання.

1. Побудуємо криву кондуктометричного титрування (рис. 2).

2. Точки еквівалентності знаходимо шляхом графічної побудови.

$V_1 = 3,43$ см³ HCl витрачено на титрування NaOH.

$V_2 = 7,54$ см³ HCl витрачено на титрування NaOH і NH₄OH.

3. Розрахуємо кількість HCl, витраченої на титрування NH₄OH.

$V_2 - V_1 = 7,54 - 3,43 = 4,11$ см³ пішло на титрування NH₄OH.

4. Розрахуємо концентрації компонентів у суміші:

$$c_{\text{NaOH}} = \frac{3,43 \cdot 0,01 \cdot 40 \cdot 1000}{1000 \cdot 50} = 0,027 \text{ г/дм}^3.$$

$$c_{\text{NH}_4\text{OH}} = \frac{4,11 \cdot 0,01 \cdot 35 \cdot 1000}{1000 \cdot 50} = 0,029 \text{ г/дм}^3.$$

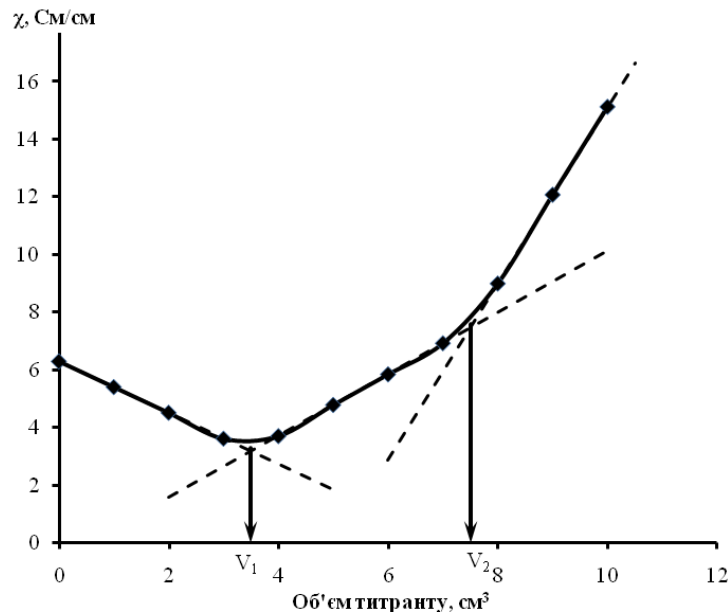


Рис.2. Крива титрування суміші NaOH і NH₃

Відповідь: концентрації NaOH і NH₄OH становлять відповідно 0,027 і 0,029 г/дм³.

Приклад 24. Розрахувати потенціал мідного електрода в розчині 0,01М за хлоридом міді при 30 °С. Розрахунок провести без урахування коефіцієнта активності йонів міді в розчині.

Розв'язання.

1. Розрахунок потенціалу мідного електрода проводимо за рівнянням Нернста (3.1):
2. Оскільки за умовою коефіцієнт активності йонів прийнятий рівним 1, то активність дорівнює концентрації $a = c = 0,01M$.
3. Користуючись додатком 6, знаходимо стандартний окисно-відновний потенціал пари Cu^{2+}/Cu^0 $E^0 = +0,34$ В.
4. Розраховуємо значення потенціалу:

$$E = 0,34 + \frac{8,31 \cdot (273 + 30)}{2 \cdot 96458} \lg 0,01 = 0,299 \text{ В.}$$

Відповідь: Потенціал мідного електрода в зазначених умовах становить 0,299 В.

Приклад 25. Побудувати криві потенціометричного титрування в координатах $E - V$ і $\Delta E/\Delta V - V$, розрахувати концентрацію CaCl₂ у розчині (г/дм³), якщо при титруванні 20,00 см³ досліджуваного розчину 0,05н Hg₂(NO₃)₂ ($f_{\text{екв}} = 0,5$) одержали:

V, см ³	10	15	17	17,5	17,9	18	18,1	18,5
E, мВ	382	411	442	457	498	613	679	700

Розв'язання.

1. Розрахунок даних для побудови диференційної кривої титрування:

V	10	15	17	17,5	17,9	18	18,1	18,5
ΔV	-	5	2	0,5	0,4	0,1	0,1	0,4
E	382	411	442	457	498	613	679	700
ΔE	-	29	31	15	41	115	66	21
$\Delta E/\Delta V$	-	5,8	15,5	30	102,5	1150	110	52,5

2. Будемо інтегральну (рис. 3.а) й диференційну (рис. 3.б) криві титрування.

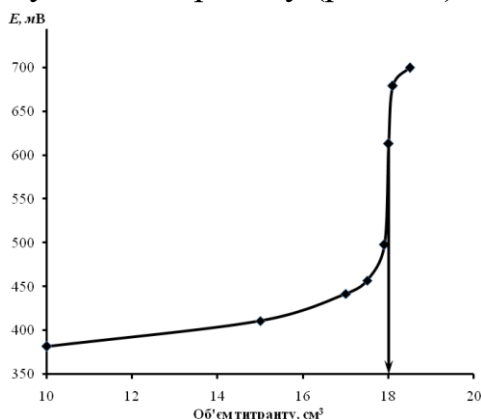


Рис. 3.а. Інтегральна крива потенціометричного титрування

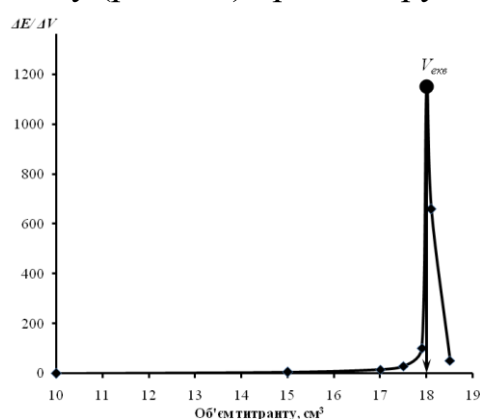


Рис. 3.б. Диференційна крива потенціометричного титрування

3. Знаходимо еквівалентний об'єм титранта ($V_{екв}$): 17,9 см³.

4. Розрахуємо концентрацію CaCl₂ у розчині

$$C_{CaCl_2} = \frac{17,9 \cdot 110 \cdot 0,05 \cdot 0,5 \cdot 1000}{1000 \cdot 20} = 2,475 \text{ г/дм}^3.$$

Відповідь: вміст CaCl₂ у розчині становить 2,475 г/дм³.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Кисень, що міститься в наважці органічної сполуки масою 2,299г, кількісно перевели в СО₂. Диоксид вуглецю розчинили в розведеному розчині лугу, який міститься в електролітичному осередку і визначили $\Delta\chi_x$ – зменшення електричної провідності поглинального розчину.

Таким самим перетворенням піддали стандартні речовини, що містять від 200 до 1000 мкг кисню, і виміряли відповідні величини $\Delta\chi$. Результати вимірів представлені нижче:

<i>m</i> у зразку, мкг	200	400	600	800	1000
$\Delta\chi \cdot 10^6$, См.....	80	150	220	285	355

Побудувати градуований графік і обчислити масову відсоткову частку (%) кисню в органічній сполуці, якщо $\Delta\chi \cdot 10^6 = 300$ См.

2. При титруванні 50,00 мл суміші NaOH і NH₃ 0,0100 М HCl одержали наступні дані для трьох варіантів суміші:

V(HCl), мл	0	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 1	6,30	5,41	4,52	3,62	3,71	4,79
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 2	5,68	4,46	3,20	—	3,00	3,84
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 3	6,60	5,98	5,30	4,68	4,05	—
V(HCl), мл	6,00	7,00	8,00	9,00	10,0	
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 1	5,85	6,93	9,00	12,08	15,1	—
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 2	4,68	5,50	7,00	10,80	14,5	—
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 3	4,45	5,70	7,80	12,02	16,2	—

Побудувати криву титрування й обчислити концентрацію (г/л) NaOH і NH₃ у досліджуваному розчині.

3. Аналізовану суміш HCl і CH₃COOH помістили в мірну колбу місткістю 50,00 мл і довели водою до мітки. При титруванні 10,00 мл розчину 0,1 М NaOH (K = 1,104) одержали наступні результати для трьох варіантів суміші:

V NaOH), мл	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 1 .	2,50	2,20	1,90	1,93	1,96
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 2 .	2,62	2,35	2,08	1,96	2,00
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 3 .	2,66	2,39	2,12	2,02	2,04
V (NaOH), мл	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 1 .	2,00	2,20	2,50	2,85	3,20
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 2 .	2,03	2,06	2,38	2,74	3,10
$\chi \cdot 10^3$ См, для р-ра 3 .	2,08	2,11	2,25	2,60	2,96

Побудувати криву титрування й визначити масу (г/л) HCl і CH₃COOH у вихідному розчині.

4. При титруванні 50,00 мл хлороводневої кислоти розчином NaOH одержали наступні дані:

V(NaOH),мл	Електрична провідність розчину $\omega \cdot 10^3$ См для варіантів				
	1	2	3	4	5
	C _{NaOH} = 0,01	C _{NaOH} = 0,10	C _{NaOH} = 0,623	C _{NaOH} = 1,012	C _{NaOH} = 1,503
0	1,50	—	4,49		8,72
2	1,09	1,42	3,00	4,05	
4	0,672	0,85	1,52	1,93	2,88
6	0,633	0,70	1,50	2,35	2,72
8	0,991	1,15	2,25	3,27	
10	1,35	1,62	3,04	—	5,52

Побудувати криву титрування в координатах ω - V(NaOH). Визначити точку еквівалентності. Розрахувати молярну концентрацію хлороводневої кислоти.

5. Аналізовану суміш H_2SO_4 і CuSO_4 довели до мітки в мірній колбі місткістю 50,00 мл. При титруванні аліквоти 10,00 мл розчином NaOH одержали наступні результати:

$V(\text{NaOH}), \text{мл}$	Електрична провідність $\omega \cdot 10^3 \text{ См}$ для варіантів		
	1	2	3
2,00	7,0	6,5	6,0
4,00	6,0	5,4	4,9
6,00	5,1	4,4	3,9
8,00	4,2	3,4	2,0
10,00	3,0	2,5	2,0
12,00	3,0	2,5	2,0
14,00	3,0	2,5	2,0
16,00	3,5	4,2	3,8
18,00	4,0	6,5	5,5
20,00	4,5	8,9	7,2

Побудувати криву титрування і обчислити масу H_2SO_4 і CuSO_4 (г) у суміші, якщо $T(\text{NaOH}) = 0,0003854 \text{ г/мл}$.

6. У стандартних розчинах, що містять іони калію, з концентрацією $c(\text{K}^+)$ були визначені електродні потенціали калійселективного електроду відносно хлоросрібного електроду і отримані наступні дані:

$c(\text{K}^+)$, моль/л	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
E , мВ	100	46,0	-7,00	-60,0

За цими даними побудували градуирований графік у координатах $E - p c_{\text{K}^+}$.

Наважку зразка масою 0,2000 г, що містить калій, розчинили у воді і об'єм довели до 100,0 мл. Потім виміряли електродний потенціал калійселективного електроду $E_x = 60,0 \text{ мВ}$ в отриманому розчині. Обчислити масову відсоткову частку (%) калію у зразку.

7. Аналізований розчин HCl розбавили в мірній колбі до 100,0 мл і аліквоту об'ємом 20,00 мл титрували 0,1000 М розчином NaOH потенціометричним методом.

Побудувати криві титрування в координатах $pH - V$ і $\Delta pH / \Delta V - V$ і визначити масу (мг) HCl у розчині за наступними даними:

Варіант 1										
$V(\text{NaOH}), \text{мл}$	1,50	1,80	1,90	1,95	1,98	2,00	2,02	2,05	2,10	
pH	2,64	3,05	3,36	3,64	4,05	6,98	9,95	10,53	10,65	
Варіант 2										
$V(\text{NaOH}), \text{мл}$	1,30	1,50	1,60	1,65	1,68	1,70	1,72	1,74	1,80	
pH	1,78	3,03	3,34	3,64	4,03	6,98	9,96	10,36	10,66	

8-9. Побудувати криві потенціометричного титрування в координатах $pH - V$ і $\Delta pH/\Delta V - V$ і визначити концентрацію (моль/л) розчину CH_3COOH , якщо при титруванні 10,00 мл цієї кислоти 0,1000 М розчином KOH одержали наступні результати:

Варіант 8

$V(KOH), \text{мл.}$	15,0	18,0	19,00	19,50	19,90	20,00	20,10	20,50	21,00
$pH.....$	5,22	5,71	6,04	6,35	7,05	8,79	10,52	11,22	11,51

Варіант 9

$V(KOH), \text{мл.}$	10,0	13,0	14,0	14,50	14,9	15,0	15,10	15,50	16,00
$pH.....$	5,05	5,56	5,88	6,19	6,92	8,82	10,59	11,29	11,58

10-11. Аналізований розчин метиламіну CH_3NH_2 об'ємом 20,00 мл розбавили в мірній колбі до 100,0 мл, потім 10,00 мл отриманого розчину титрували потенціометричним методом 0,1000 М розчином HCl .

Побудувати криві титрування в координатах $pH - V$ і $\Delta pH/\Delta V - V$ і визначити концентрацію (моль/л) вихідного розчину метиламіну за наступними даними:

Варіант 10

$V(HCl), \text{мл.}$	10,0	12,0	14,0	14,50	14,90	15,0	15,10	15,50	16,0
$pH.....$	10,40	10,12	9,56	9,28	8,42	6,02	3,52	2,85	2,55

Варіант 11

$V(HCl), \text{мл.}$	12,0	15,0	17,0	17,5	17,80	18,0	18,20	18,50	19,0
$pH.....$	10,36	9,96	9,43	9,17	8,28	5,99	3,28	2,89	2,58

13. Наважку срібного сплаву масою 2,157 г розчинили і після відповідної обробки довели об'єм розчину до 100,0 мл.

Побудувати криві потенціометричного титрування в координатах $E - V$ і $\Delta E/\Delta V - V$ і визначити масову відсоткову частку (%) срібла в сплаві, якщо при титруванні 25,00 мл отриманого розчину 0,1200 М розчином $NaCl$ одержали:

$V(NaCl), \text{мл.}$	16,00	18,00	19,00	19,50	19,90
$E, \text{ мВ.}$	689	670	652	634	594

$V(NaCl), \text{мл.}$	20,00	20,10	20,50	21,00
$E, \text{ мВ.}$	518	440	401	383

14. Побудувати криві потенціометричного титрування в координатах $E - V$ і $\Delta E/\Delta V - V$ і розрахувати концентрацію (г/л) $CaCl_2$,

якщо при титруванні 20,00 мл аналізованого розчину 0,0500 н. розчином $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2$ ($f_{\text{экв}} = 1/2$) одержали:

$V(\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2)$, мл...	10,00	15,00	17,00	17,50	17,90
E , мВ.....	382	411	442	457	498
$V(\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2)$, мл...	18,00	18,10	18,50	19,00	
E , мВ.....	613	679	700	709	

15. Побудувати криві потенціометричного титрування в координатах E — V і $\Delta E/\Delta V$ — V і розрахувати концентрацію (г/л) MgBr_2 , якщо при титруванні 20,00 мл розчину 0,1000 н. розчином $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ($f_{\text{экв}} = 1/2$) одержали:

$V(\text{Hg}(\text{NO}_3)_2)$, мл	10,00	15,00	18,00	19,00	19,50
E , мВ.....	501	526	552	570	589
$V(\text{Hg}(\text{NO}_3)_2)$, мл	19,90	20,00	20,10	20,50	
E , мВ.....	629	704	737	757	

16. Наважку мідного сплаву масою 0,7500 г розчинили, об'єм розчину довели до 250,0 мл. У комірку для потенціометричного титрування помістили 20,00 мл отриманого розчину, додали KI і відтитрували розчином тіосульфату натрію з титром по міді $T(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/\text{Cu}) = 0,01664$ г/мл.

Побудувати криві титрування в координатах E — V і $\Delta E/\Delta V$ — V і розрахувати масову відсоткову частку (%) міді в сплаві за наступними даними:

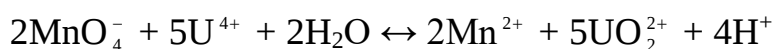
$V(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$, мл...	1,50	1,90	2,00	2,05	2,08	2,10	2,12	2,15	2,20
E , мВ.....	475	445	424	405	382	305	232	186	162

17. Наважку сталі масою 1,200 г розчинили, залізо перевели в $\text{Fe}(\text{II})$ і титрували потенціометричним методом 1,000 М розчином $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$.

Побудувати криві титрування в координатах E — V і $\Delta E/\Delta V$ — V і обчислити масову відсоткову частку (%) заліза в сплаві за даними:

$V(\text{Ce}(\text{SO}_4)_2)$, мл	2,00	10,00	18,00	19,80	20,00	20,20	22,00
E , мВ	712	771	830	889	1110	1330	1390

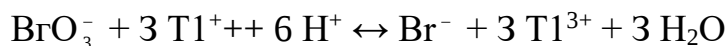
18. Наважку руди масою 0,0800 г розчинили, уран перевели в уран (IV) і титрували потенціометричним методом 0,0100 н. розчином KMnO_4 ($f_{\text{экв}}=1/5$):



Побудувати криві титрування в координатах E — V і $\Delta E/\Delta V$ — V і обчислити масову відсоткову частку (%) урану в руді за наступними даними:

$V(\text{KMnO}_4)$, мл	2,00	10,00	16,00	17,80	18,00	18,20	20,00
E , мВ	301	330	359	389	1170	1480	1500

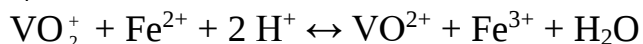
19. Наважку зразка масою 2,040 г розчинили і талій (1) титрували потенціометричним методом 0,1000 н. розчином KBrO_3 ($f_{\text{экв}} = 1/6$) у солянокислому середовищі:



Побудувати криві титрування в координатах $E - V$ і $\Delta E/\Delta V - V$ і обчислити масову відсоткову частку (%) талію в сплаві за наступними даними:

$V(\text{KBrO}_3)$, мл	2,00	10,00	17,00	18,80	19,00	19,20	21,00
E , мВ	1250	1280	1310	1340	1410	1430	1450

20. Наважку сталі масою 2,000 г розчинили в нітратній кислоті і після відповідної обробки ванадій титрували потенціометричним методом 0,1000 М розчином FeSO_4 :



Побудувати криві титрування в координатах $E - V$ і $\Delta E/\Delta V - V$ і обчислити масову відсоткову частку (%) ванадію в сталі за наступними даними:

$V(\text{FeSO}_4)$, мл	2,00	12,00	19,00	20,80	21,00	21,20	23,00
E , мВ	1060	1000	940	901	885	841	830

2.4. Оптичні методи аналізу. Спектрофотометрія

Аналітичне застосування абсорбційних оптичних методів аналізу ґрунтується на використанні об'єднаного закону світлопоглинання Бугера-Ламберта-Бера (основного закону світлопоглинання):

$$\lg \frac{I_0}{I} = \lambda \cdot c \cdot l \quad (55)$$

де: I_0 - інтенсивність електромагнітного випромінювання, що падає на розчин речовини;

I - інтенсивність електромагнітного випромінювання, яке пройшло через розчин речовини;

l - товщина шару розчину;

c - концентрація розчину, що досліджується;

λ - показник поглинання розчину.

Величину $\lg \frac{I_0}{I}$ називають **оптичною густиною**. Її позначають буквами A або D).

Показник поглинання λ - константа для кожної речовини при певній довжині хвилі світлового випромінювання. Вона дорівнює оптичній густині розчину з концентрацією та товщиною шару, що дорівнюють одиниці.

Якщо концентрацію виражають в моль/дм³, то λ позначають через ε і називають *молярним коефіцієнтом світлопоглинання (молярний коефіцієнт екстинкції)*.

Суворе підпорядкування закону Бугера-Ламберта-Бера має місце тільки при монохроматичному випромінюванні, яке використовують у спектрофотометрії. У фотометрії використовують немонохроматичне випромінювання. При цьому основний закон світлопоглинання може бути застосованим з більшим або меншим наближенням, яке пов'язане з постійністю величин коефіцієнта поглинання в певному інтервалі довжин хвиль, що отримують за допомогою світлофільтрів. Вони дозволяють виділити порівняно вузький інтервал довжин хвиль у ділянці смуги поглинання речовини, що досліджується. При цьому найменші помилки матимуть місце для речовин з широкою смугою поглинання.

Фотоколориметрія побудована на вимірюванні поглинання немонохроматичного світла, що проходить крізь розчин за допомогою приладів, які називають фотоелектроколориметрами (ФЕК). Немонохроматичне випромінювання з вузьким діапазоном хвиль одержують за допомогою світлофільтрів. Інтенсивність немонохроматичного випромінювання визначають за величиною струму, який виникає у фотоелементі. Шкала цих приборів градуирована у величинах оптичної густини A та відсотках пропускання T . Величина T дорівнює відношенню $\frac{I}{I_0}$. Зв'язок між величинами A і T виражають рівнянням:

$$A = -\lg T \quad (56)$$

При розробці методик фотометричних визначень слід враховувати ряд факторів:

- вибір світлофільтрів здійснюють таким чином, щоб максимум поглинання розчину (максимум на кривій світло поглинання відповідав мінімуму поглинання світлофільтра; 1
- визначення умов виконання фотометричної реакції (рН, природа і кількість реагенту та інші), які дозволяють отримувати стійкі за часом і достатньо високі значення оптичної густини.

Максимально відтворювані результати при мінімальній помилці визначення на фотоелектроколориметрах мають місце, коли оптична густина знаходиться в інтервалі 0,2-0,7.

Спектрофотометрія. Відмінність цього методу від фотоколориметри полягає в тому, що аналіз здійснюють за поглинанням речовинами монохроматичного випромінювання у видимій, УФ- і ІЧ-ділянках спектра.

Якісний аналіз речовин за їх спектрами поглинання проводять двома способами:

- за відомими параметрами спектра поглинання досліджуваної речовини;
- порівнянням спектрів поглинання розчину стандартної речовини і розчину досліджуваної речовини одного й того ж складу.

Застосування в аналізі методу спектрофотометрії, як і інших фотометричних методів, ґрунтується на використанні для визначення концентрацій речовин закону Бугера-Ламберта-Бера. На відміну від фотоколориметричних визначень у спектрофотометрії можна аналізувати не тільки забарвлені, але й безбарвні розчини. В останньому випадку аналіз проводять не у видимій, а в УФ- або ІЧ-ділянках спектра.

Спектрофотометричні методи в порівнянні з фотоколориметричними дозволяють вирішити більш широке коло питань:

- одночасове кількісне визначення декількох компонентів багатокомпонентних сумішей;
- визначення складу і констант стійкості комплексних сполук;
- визначення констант іонізації кислот, основ та ін.

Основним видом приладів для спектрофотометрії є спектрофотометри, в яких на відміну від фотоелектроколориметрів монохроматизація забезпечується не світлофільтрами, а спеціальними оптичними пристроями - монохроматорами, які дозволяють безперервно змінювати довжину хвилі електромагнітного випромінювання, що проходить крізь розчин, який аналізують.

Відносна помилка спектрофотометричних визначень індивідуальних речовин не перевищує 2 %.

Концентрацію розчину та товщину шару підбирають таким чином, щоб значення оптичної густини знаходилось у межах 0,2-0,7, що забезпечує мінімальну помилку вимірювань.

Основні методи визначення концентрації розчинів за допомогою фотометричних приладів розглянуті нижче.

1) Метод порівняння

Для визначення концентрації досліджуваного розчину c_x готують стандартний розчин даної речовини певної концентрації та вимірюють його оптичну густину D_{cm} . Потім визначають оптичну густину досліджуваного розчину D_x за тієї ж довжини хвилі та за такої ж товщини шару розчину (у тих самих кюветах). Значення оптичної густини порівнюваних розчинів відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера дорівнюють:

для досліджуваного розчину $D_x = \varepsilon \cdot c_x \cdot l$;

для стандартного розчину $D_{cm} = \varepsilon \cdot c_{cm} \cdot l$.

Поділивши одне вираження на інше, одержимо:

$$c_x = \frac{D_x \cdot c_{cm}}{D_{cm}} \quad (57)$$

Метод порівняння застосовують при однократних визначеннях, він вимагає обов'язкового виконання основного закону світлопоглинання.

2) Метод обмежуючих розчинів

Існує також інший, більш точніший спосіб визначення невідомої концентрації c_x , який називається методом обмежуючих розчинів. Готують два стандартних розчини з концентраціями c_1 і c_2 таким чином, щоб оптична густина першого з них D_1 була меншою за оптичну густина D_x досліджуваного розчину, а оптична густина D_2 другого стандартного розчину була б, навпаки, більшою за D_x . Вимірюють значення оптичної густини розчинів, невідому концентрацію досліджуваного розчину розраховують за формулою:

$$c_x = c_1 + \frac{(c_2 - c_1) \cdot (D_x - D_1)}{(D_2 - D_1)} \quad (58)$$

3) Метод калібрувального графіка

Функціональна залежність $D=f(c)$ між оптичною густиною розчину і концентрацією поглинаючої речовини може бути встановлена графічно. Для цього попередньо готують серію з 5-8 стандартних розчинів різних концентрацій (не менше трьох паралельних розчинів для кожної точки) і вимірюють оптичну густина цих розчинів при оптимальній довжини хвилі λ_{max} . За отриманими даними будують калібрувальний графік в координатах $D=f(c)$ (рис. 4). Для одержання точніших результатів розраховують рівняння для калібрувального графіка, використовуючи метод найменших квадратів.

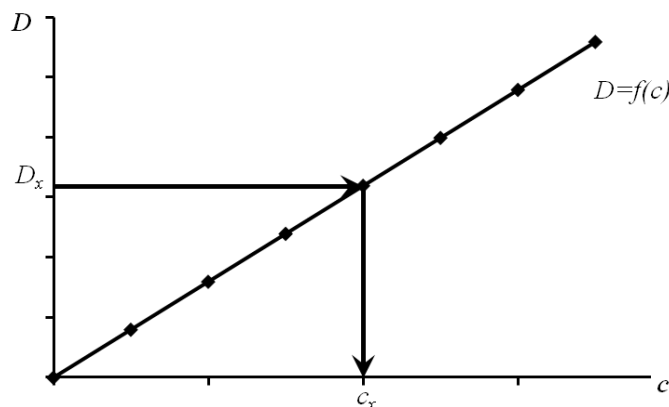


Рис. 4. Залежність оптичної густини розчину від концентрації поглинаючої речовини (метод калібрувального графіка)

Визначають значення оптичної густини досліджуваного розчину D_x при тій самій товщині шару, знаходять її значення на вісі ординат калібрувального графіка, а потім на вісі абсцис – відповідне значення концентрації c_x .

Якщо оптична густина розчину не підкорюється закону Бугера-Ламберта-Бера, то прямолінійна залежність D від c порушується. У цьому

випадку необхідно збільшити число стандартних розчинів таким чином, щоб розходження їхніх концентрацій не перевищувало 10 %.

Метод калібрувального графіка застосовують при виконанні серійних фотометричних аналізів. Періодично калібрувальний графік перевіряють за серією свіжовиготовлених стандартних розчинів.

4) Метод додавання відомої кількості стандарту

Метод додавання відомої кількості стандарту представляє собою різновид методу порівняння. У цьому випадку вимірюють оптичну густину досліджуваного розчину D_x , додають до нього відому кількість досліджуваної речовини й у тих самих умовах вимірюють оптичну густину розчину $D_{x+доб}$. При дотриманні основного закону світлопоглинання і сталій товщині шару відношення оптичної густини досліджуваного розчину й розчину з добавкою дорівнюватиме відношенню їхніх концентрацій:

$$\frac{D_x}{D_{x+доб}} = \frac{c_x}{c_{x+доб}} \quad \text{або} \quad c_x = \frac{c_{доб} \cdot D_x}{D_{x+доб} - D_x} \quad (59)$$

де c_x – концентрація досліджуваного розчину; $c_{доб}$ – концентрація добавки в досліджуваному розчині.

Метод додавання відомої кількості стандарту застосовують для усунення впливу сторонніх домішок, а також у ряді випадків для оцінки правильності методики фотометричного визначення. Цей метод дозволяє створити однакові умови для фотометрування досліджуваного і стандартного (з добавкою) розчинів.

5) Визначення концентрації речовини в розчині за значенням молярного коефіцієнта поглинання

Готують ряд стандартних розчинів, визначають їх оптичну густину і потім за рівнянням основного закону (1) розраховують величини молярного коефіцієнта світлопоглинання. Проводять статистичну обробку отриманих даних, знаходять середнє значення ε і його відносну похибку $\Delta\varepsilon$, %. Якщо $\Delta\varepsilon$ перевищує необхідну точність визначення концентрації, збільшують число стандартних розчинів.

Для визначення концентрації досліджуваного розчину c_x вимірюють його оптичну густину D_x у тих самих умовах, для яких визначений молярний коефіцієнт світлопоглинання ε .

Розрахунок c_x проводять за рівнянням:

$$c_x = \frac{D_x}{\varepsilon \cdot l} \quad (60)$$

Метод вимагає підпорядкування розчинів закону Бугера-Ламберта-Бера.

6) Метод диференційної спектрофотометрії

При високих концентраціях розчинів досліджуваних речовин, коли оптична густина стає більшою за одиницю, різко зростає похибка спектрофотометричних вимірювань. Цього можна уникнути, якщо

використовувати метод диференційної спектрофотометрії. Цей метод відрізняється від звичайної фотометрії тим, що у якості розчину порівняння в ньому використовують один із стандартних розчинів досліджуваної речовини. При цьому концентрації досліджуваного розчину і розчину порівняння повинні бути близькими. Цей метод дозволяє розширити діапазон фотометричних визначень. Так, якщо розчин порівняння має оптичну густину $D_{пор}=1,2$, а досліджуваний розчин $D_x=1,6$, тоді при вимірюванні оптичної густини досліджуваного розчину відносно оптичної густини розчину порівняння одержують оптичну густину досліджуваного розчину, яка дорівнює різниці $D_x - D_{пор}=1,6 - 1,2=0,4$. Розрахунок c_x можна зробити також за формулою:

$$c_x = \frac{D_x - D_{пор}}{\varepsilon \cdot l} \quad (61)$$

де D_x – відносна оптична густина досліджуваного розчину; $D_{пор}$ – оптична густина розчину порівняння.

Приклади розв'язання задач

Приклад 26. Різні об'єми стандартного розчину, який містить 1 мг Cu в 1мл, після обробки розчинами гідроксиду амонію і дитіоксаміду розбавили водою до 100 мл і виміряли пропускання T . При цьому були отримані наступні результати:

Об'єм стандартного розчину, мл	2	4	6	8	10
Пропускання (T), %	22	37	51	65	79

Наважку 1 г металу, який містить Cu, розчинили в кислоті й розбавили розчин водою до 10 мл. З 1мл цього розчину одержали 25 мл розчину, пропускання якого складає 43%. Визначити масову відсоткову частку Cu в металі (%).

Розв'язання. Для рішення завдання застосовуємо метод калібрувального графіка.

1. Розраховуємо вміст Cu в 1 мл стандартного розчину: $c_{Cu}=m_{Cu}/V_{заг}$ і за отриманими даними будуємо калібрувальний графік (рис. 5).

2. За графіком (рис. 5) знаходимо концентрацію Cu в мг/мл за величиною пропускання 43 % – 0,048 мг/мл. З урахуванням розведення, кількість Cu в 1г металу складає:

$$m = 0,048 \cdot 25 \cdot 10 = 1,2 \text{ мг} = 0,0012 \text{ г}$$

$$3. \text{ Відсотковий вміст } \omega_{Cu} = \frac{0,0012 \cdot 100\%}{1} = 12\%$$

Відповідь: Вміст Cu в зразку складає 12 %.

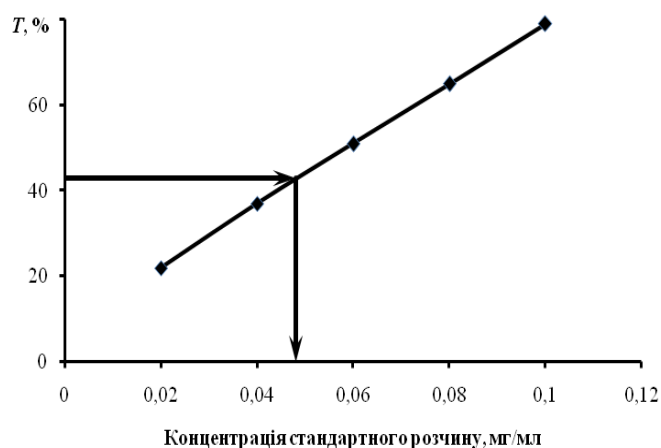


Рис. 5. Залежність пропускання розчину від концентрації стандартного розчину Cu.

Приклад 27. Після розчинення 0,2500 г сталі розчин розбавили до 100,0 мл. У три колби місткістю 50,0 мл помістили по 25,0 мл цього розчину й додали: у першу колбу – стандартний розчин, який містить 0,50 мг Ti, розчини H_2O_2 і H_3PO_4 , у другу – розчини H_2O_2 і H_3PO_4 , у третю – розчин H_3PO_4 (нульовий розчин). Розчини розбавили й фотометрували два перших розчини щодо третього. Отримали значення оптичної густини: $D_{x+\text{доб}} = 0,650$, $D_x = 0,250$. Розрахувати масову частку (%) титану в сталі.

Розв’язання. Для рішення завдання скористаємося методом добавок.

1. Визначаємо концентрацію титану, доданого зі стандартним розчином:

$$c_{\text{доб}} = \frac{0,50}{50,0} = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ мг/мл.}$$

2. Розраховуємо концентрацію титану за формулою

$$c_x = c_{\text{доб}} \frac{D_x}{D_{x+\text{доб}} - D_x} = 1,00 \cdot 10^{-2} \frac{0,250}{0,650 - 0,250} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ мг/мл.}$$

3. Визначаємо масу титану у взятій наважці з урахуванням розведення й об'єму досліджуваної проби: $m = \frac{6,25 \cdot 10^{-3} \cdot 50,0 \cdot 100,0}{25,0} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$

4. Розраховуємо масову відсоткову частку титану в сталі:

$$\omega = \frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{0,2500} = 0,50\%$$

Відповідь: масова відсоткова частка титану в сталі становить 0,5%.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Молярний коефіцієнт світлопоглинання дитизонату міді(II) у тетрахлориді вуглецю при $\lambda_{\text{эфф}} = 550 \text{ нм}$ дорівнює $\varepsilon = 4,52 \cdot 10^4$. Яку масову відсоткову частку (%) міді можна визначити з дитизоном, якщо із наважки сплаву масою 1,00 г отримали 25,00 мл розчину дитизонату в CCl_4 і обчислили мінімальну оптичну густину 0,020 в кюветі $l = 5,0 \text{ см}$?

2. Молярний коефіцієнт світлопоглинання комплексу $\text{MoO}(\text{SCN})_5^{2-}$ в ізоаміловому спирті при $\lambda_{\text{эфф}} = 475$ нм дорівнює $\epsilon = 1,50 \cdot 10^4$. Обчислити мінімальну масову відсоткову частку (%) молібдену в ґрунті, яку можна визначити цим методом, якщо з наважки ґрунту масою 20,00 г витягають молібден в 200,0 мл оксалатного буферного розчину. Відбирають 150,0 мл фільтрату і після відповідної обробки екстрагують $\text{MoO}(\text{SCN})_5^{2-}$ 15,00 мл ізоамілового спирту. Екстракт фотометрують у кюветі $l = 3,0$ см. Мінімальну оптичну густину приймають 0,020.

3. Для визначення нікелю з діметилгліоксимом наважку сталі розчиняють і розводять розчин до 100,0 мл. До 5,00 мл розчину додають необхідні реактиви, розбавляють водою до 50,00 мл і фотометрують при $l = 1,0$ см, $\lambda_{\text{эфф}} = 470$ нм ($\epsilon = 1,30 \cdot 10^4$). Обчислити масу наважки сталі для аналізу, якщо оптимальне значення оптичної густини 0,435 і приблизна масова відсоткова частка (%) нікелю в сталі дорівнює: 1) 0,5 %; 2) 1,0 %; 3) 5,0 %.

4. Для визначення заліза (III) у концентрованій сульфатній кислоті у вигляді сульфосаліцилату, наважку поміщають у колбу місткістю 100,0 мл, додають необхідні реактиви і доводять водою до мітки. Вимірюють оптичну густину при $\lambda_{\text{эфф}} = 420$ нм ($\epsilon = 6,0 \cdot 10^3$) і товщині кювети $l = 5$ см. Розрахувати масу наважки кислоти для аналізу, якщо $\omega_{\text{Fe(III)}} = 0,001$ %. Оптимальне значення оптичної густини дорівнює 0,435.

5. У дві мірні колби місткістю 100,0 мл помістили по 10,00 мл стічної води. В одну колбу додали 10,00 мл стандартного розчину CuSO_4 з $T(\text{Cu}) = 0,00100$. В обидві колби ввели розчини аміаку, рубеановодневої кислоти й розбавили водою до мітки. Фотометруючи розчини одержали оптичні густини $A_x = 0,24$ і $A_{x+cm} = 0,38$. Визначити концентрацію (г/л) купруму в стічній воді.

6. Наважку сталі масою 0,500 г розчинили в колбі місткістю 50,0 мл. Дві проби по 20,00 мл помістили в колби місткістю 50,0 мл. В одну колбу додали розчин, що містить 0,00300 г ванадію. В обидві колби долили гідроген пероксид і довели водою до мітки. Обчислити масову відсоткову частку (%) ванадію в сталі, якщо фотометруючи розчини одержали наступні оптичні густини $A_x = 0,200$ і $A_{x+ст} = 0,480$.

7. Наважку сталі масою 0,46 г розчинили в колбі місткістю 50,0 мл. У дві мірні колби місткістю 50,0 мл відібрали аліквоти по 20,00 мл. В одну колбу додали розчин, що містить 0,00100 г Ti. В обидві колби помістили розчин гідроген пероксиду і довели розчини до мітки. Обчислити масову відсоткову частку (%) титану в сталі, якщо фотометруючи розчини одержали наступні оптичні густини $A_x = 0,200$ і $A_{x+cm} = 0,42$.

8. Вміст антрацену в розчині визначали по власному поглинанню при 253 нм. Відносна оптична густина стандартного розчину, що містить 35,0 мг/л антрацену, дорівнює $A_{\text{отн.см}} = 0,412$. У досліджуваного розчину ця величина дорівнює $A_{\text{отн. x}} = 0,396$. У кюветі порівняння в обох випадках був розчин з вмістом 30,0 мг/л антрацену. Обчислити концентрацію (мг/л) антрацену в досліджуваному розчині.

9. Відносна оптична густина розчину сульфосаліцилатного комплексу заліза(III) дорівнює $A_{\text{отн. x}} = 0,290$ ($l = 5$ см). Обчислити концентрацію (мг/мл) заліза, якщо розчин порівняння містить 0,0576 мг Fe в 50,0 мл, а молярний коефіцієнт поглинання сульфосаліцилатного комплексу заліза(III) дорівнює 3000.

10. Для приготування стандартного розчину цирконію наважку $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ масою 0,3533 г розчинили в 100,0 мл хлорводневої кислоти. У мірні колби місткістю 50,0 мл помістили 1,00; 1,20; 1,50; 1,70; 2,00 мл стандартного розчину, додали галлоціанін МС (цирконін) і довели до мітки водою. Виміряли оптичні густини щодо першого розчину. Одержали величини $A_{\text{отн}}$ для другого, третього, четвертого й п'ятого розчинів відповідно: 0,100; 0,235; 0,330; 0,470. Наважку цирконієвого сплаву масою 0,1120 г розчинили в 100,0 мл суміші кислот. У мірну колбу місткістю 50,0 мл відібрали аліквоту 2,00 мл, додали цирконін і довели до мітки. Виміряли відносну оптичну густина $A_{\text{отн. x}} = 0,320$, як при побудові градуйованого графіку. Обчислити масову відсоткову частку (%) цирконію в сплаві.

11. Для побудови градуйованого графіку в координатах $A_{\text{отн}} - c(\text{Mn})$ у мірні колби місткістю 250,0 мл помістили 11,00; 12,00; 13,00; 14,00; 15,00 мл стандартного розчину, що містить 1,25 мг/мл Mn, і окислили манган до перманганату. Оптичну густина виміряли відносно розчину, що містить 12,5 мг Mn в 250,0 мл, і одержали:

$V_{\text{см}}$, мл	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
$A_{\text{отн}}$	0,200	0,400	0,600	0,800	1,01

Наважку руди масою 0,5000 г розчинили і розчин розбавили до 1000,0 мл. Манган, що міститься в 50,0 мл фільтрату, окислили до перманганату і розчин розбавили водою до 250,0 мл. Виміряли відносну оптичну густина, як при побудові градуйованого графіку. Обчислити масову відсоткову частку (%) мангану в зразках руди, якщо $A_{\text{отн}} = 0,560$.

12. Наважку стандартного алюмінієвого сплаву, що містить 12,50 % Si, масою 0,3000 г розчинили в колбі місткістю 500,0 мл. Для побудови градуйованого графіку в мірні колби місткістю 100,0 мл помістили 5,00; 5,20; 5,40; 5,60; 5,80; 6,00 мл цього розчину, додали реактиви — розчини

молібдата амонію і сульфата заліза (II) і довели до мітки. Виміряли оптичні густини щодо першого розчину і одержали:

$V_{ст}, \text{мл} \dots\dots$	5,20	5,40	5,60	5,80	6,00
$A_{опт} \dots\dots\dots$	0,105	0,215	0,330	0,440	0,550

Наважку аналізованого сплаву масою 0,2500 г розчинили в колбі місткістю 500,0 мл. Пробу 5,00 мл помістили в мірну колбу місткістю 100,0 мл, додали реактиви і виміряли відносну оптичну густину, як при побудові градуйованого графіку. Обчислити масову відсоткову частку (%) кремнію в зразку, якщо $A_{опт\ x} = 0; 270$.

13. Наважку $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ масою 0,5046 г розчинили в хлорній кислоті і розчин розбавили до 1000,0 мл. Для побудови градуйованого графіку в мірні колби місткістю 50,0 мл помістили 10,00; 20,00; 25,00; 30,00; 35,00 мл цього розчину, додали суміш молібдата і метаванадата амонію і розбавили водою до мітки. Виміряли оптичну густину щодо першого розчину і одержали:

$V_{ст}, \text{мл}$	20,00	25,00	30,00	35,00
$A_{опт} \dots\dots\dots$	0,186	0,285	0,380	0,475

Наважку нітроамофоски масою 0,3000 г розчинили в хлороводневої кислоті і розбавили розчин до 250,0 мл. Аліквоту 20,00 мл помістили в колбу місткістю 50,0 мл і виконали ті ж операції, як при побудові градуйованого графіку. Обчислити масову відсоткову частку (%) P_2O_5 у нітроамофосці, якщо $A_{опт\ x} = 0,455$.

14. Стандартний розчин церію приготували розчиненням 0,0500 г CeO_2 в 250,0 мл суміші хлорної й хлороводневої кислот. У колби місткістю 25,00 мл помістили: 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50; 5,00 мл стандартного розчину, додали аміак, пероксид гідрогену, нітрилтриоцтову кислоту і розбавили до мітки водою. Виміряли оптичну густину щодо першого розчину і одержали:

$V_{ст}, \text{мл} \dots\dots\dots$	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$A_{опт} \dots\dots\dots$	0,135	0,270	0,405	0,545	0,680

Наважку оксидів лантановідів масою 0,0500 г розчинили, додали необхідні реактиви, розбавили до 25,00 мл і виміряли оптичну густину, як при побудові градуйованого графіку. Обчислити масову відсоткову частку (%) CeO_2 у зразку, якщо $A_{опт.х} = 0,510$.

15. З наважки руди масою 0,1000 г, що містить ніобій, після відповідної обробки одержали 100,0 мл розчину. У мірні колби місткістю 25,00 мл помістили 2,00; 3,00 і 3,00 мл отриманого розчину, у третю колбу додали 1,00 мл стандартного розчину, що містить 10,0 мкг/мл ніобію. У кожену колбу долили ЕДТА, винну й сірчану кислоти, нагріли для прискорення реакції комплексоутворення, остудили і довели до мітки. Оптичну густину другого $A_{\text{отн}2}=0,325$ і третього $A_{\text{отн}3}=0,51$ розчинів виміряли щодо розчину в першій колбі. Обчислити масову відсоткову частку (%) ніобію в руді.

16. Для приготування стандартного розчину наважку алюмінію високої чистоти масою 0,0688 г розчинили у хлороводневій кислоті і розчин розбавили водою до 1000,0 мл. У мірні колби місткістю 50,0 мл помістили 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00 мл цього розчину, додали NaOH до pH 3,5, ацетатний буферний розчин і індикатор ксиленоловий жовтогарячий. Після нагрівання і охолодження довели до мітки. Для побудови градуйованого графіку виміряли оптичні густини щодо першого розчину і одержали:

$V_{\text{ст}}$, мл	1,50	2,00	2,50	3,00
$A_{\text{отн}}$	0,075	0,150	0,225	0,280

Наважку апатито-нефелінової руди масою 0,1000 г після відповідної обробки перенесли в мірну колбу місткістю 100,0 мл і розчин довели водою до мітки. У мірну колбу місткістю 50,0 мл помістили аліквоту 1,00 мл, додали реактиви, як при побудові градуйованого графіку, довели водою до мітки й фотометрували за тих самих умов. Обчислити масову відсоткову частку (%) Al_2O_3 , якщо $A_{\text{отн.х}}=0,085$.

18-20. Аналіз гідроген пероксиду заснований на окислюванні їм заліза(II) і фотометричному визначенні залишку заліза(II) з 1,10-фенантролином. Для побудови градуйованого графіку в мірні колби місткістю 50,0 мл помістили 1,00; 1,10; 1,20; 1,30; 1,40; 1,50 мл стандартного розчину гідроген пероксиду з концентрацією $1,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л. У кожену колбу додали хлорну кислоту, ацетат натрію, залізо(II), 1, 10-фенантролін і розбавили водою до мітки. Виміряли оптичні густини щодо останнього стандартного розчину і одержали:

$V_{\text{ст}}$, мл	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
$A_{\text{отн}}$	0,340	0,270	0,205	0,135	0,070

Обчислити концентрацію (моль/л) H_2O_2 , якщо 20,00 мл розчину, що досліджують помістили в мірну колбу місткістю 500,0 мл, додали зазначені вище реактиви, фотометрували, як при побудові градуйованого графіку, і одержали результати: 18) $A_{\text{отн.х}} = 0,120$; 19) $A_{\text{отн.х}} = 0,170$; 20) $A_{\text{отн.х}} = 0,255$.

2.5. Хроматографічні методи аналізу

Під хроматографією розуміють процес розділення сумішей речовин, який ґрунтується на кількісних відмінностях поведінки компонентів, які розділяються при їх безперервному перерозподілі між двома фазами, що контактують, одна з яких нерухома, а друга – має сталий напрямок руху. Хроматографію використовують у таких випадках:

- для розділення складних сумішей на компоненти;
- визначення ступеня чистоти або однорідності хімічних сполук;
- ідентифікації речовин;
- кількісного визначення компонентів суміші.

Існують різні варіанти класифікації хроматографічних методів, в основі яких лежить:

I. Агрегатний стан рухомої фази:

1. Рідинна хроматографія.
2. Газова хроматографія:
 - а) газотверда (газоадсорбційна);
 - б) газорідинна.

II. Механізм розділення:

1. Адсорбційна (рідинна, газова).
2. Розподільна.
3. Осадова.
4. Іонообмінна.

III. Техніка виконання аналізу:

1. Колонкова.
2. Капілярна.
3. Площинна (паперова, тонкошарова).

Адсорбційна хроматографія. Нерухомою фазою в адсорбційній хроматографії є твердий адсорбент, який наповнює хроматографічну колонку. Крізь колонку безупинно рушиться друга фаза, яка містить компоненти, що розділяються. На виході з колонки вимірюється концентрація речовин. Залежність концентрації речовини від об'єму розчину, що пропущений крізь колонку називається *хроматограмою* або *вихідною кривою*.

Використовуючи дані по висотах піків або їхніх площ, можна розрахувати кількісний склад проби методами нормування (з використанням або без використання поправочних коефіцієнтів), зовнішньої стандартизації (абсолютного градування), внутрішньої стандартизації.

А) Метод нормування найчастіше використовують на практиці (рис. 6).

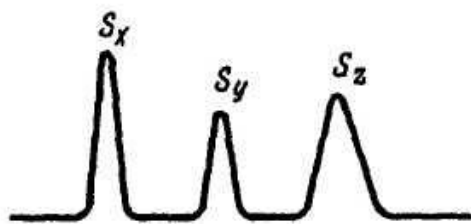


Рис.6. Визначення компонентів методом нормування

Для його використання необхідно, щоб на хроматограмі були зареєстровані всі компоненти, що входять до складу аналізованої суміші. Частка площі піка відповідає змісту компонента в масових відсотках. При аналізі суміші трьох компонентів відносний зміст компонента, що наприклад відповідає піку x на хроматограмі, можна розрахувати за формулою:

$$x, \% = \frac{S_x}{S_x + S_y + S_z} 100, \quad (62)$$

де:

S_x, S_y, S_z - площі піків.

Формулу (21) використовують тільки в тому випадку, якщо детектор однаково чутливий до кожного з компонентів суміші.

Якщо ж чутливість детектора різна стосовно кожного з компонентів проби, то використовують поправочні коефіцієнти f_x, f_y, f_z , що враховують чутливість детектора до даного компонента. Формула для розрахунку в цьому випадку записується так:

$$x, \% = \frac{S_x \cdot f_x}{\sum S_n \cdot f_n} 100 \quad (63)$$

Поправочні коефіцієнти одержують при аналізі стандартних серій.

Б) Метод зовнішнього стандарту використовують при визначенні окремих речовин або аналізі простих сумішей, а також у випадку визначення мікродомішок. При однакових умовах крізь колонку пропускають два стандартних і один досліджуваний розчин. Концентрацію речовини, що аналізується визначають графічно, або розраховують:

$$x, \% = S_x \cdot k, \quad (64)$$

де:

k - градувальник коефіцієнт, що визначається за даними стандартних розчинів.

$$k = \frac{x_{cm}, \%}{S_{cm}} \quad (65)$$

В) Метод внутрішнього стандарту застосовують при відсутності на хроматограмі піків деяких компонентів аналізованої суміші. Метод заснований на тім, що в аналізовану суміш уводять деяку певну кількість стандартної речовини. Ця речовина повинна бути хімічно інертною і бути відсутньою в обумовленій пробі та повністю відділятися від інших компонентів суміші; концентрація внутрішнього стандарту повинна бути близька до концентрацій обумовлених компонентів, пік симетричним. Для визначення поправочних коефіцієнтів (нормувальних множників) складають різні суміші (відомого складу) внутрішнього стандарту з кожним з компонентів; одержують хроматограми таких сумішей. Визначають площі піків, і для кожного компонента розраховують поправочний коефіцієнт за формулою:

$$k = \frac{S_{в.ст} \cdot c_x}{S_x \cdot c_{в.ст}}, \quad (66)$$

де:

$S_{в.ст}, S_x$ - площі піків внутрішнього стандарту і обумовленого компонента;

$c_{в.ст}, c_x$ - концентрації стандарту і досліджуваної речовини в штучних сумішах.

Знаючи поправочні коефіцієнти, вміст компонента розраховують за формулою:

$$x, \% = k \cdot r \cdot \frac{S_x}{S_{в.ст}} 100, \quad (67)$$

де:

$r = m_{в.ст} / m_{проби}$ - відношення маси внутрішнього стандарту до маси пробі речовини, що аналізується.

Розподільна хроматографія побудована на різниці у величинах коефіцієнтів розподілу окремих компонентів між рухомою і нерухомою фазами.

Для хроматографування необхідна наявність двох фаз: нерухомої (полярні розчинники: вода, метиловий спирт) і рухомої (менш полярні рідини, що не змішуються з водою, — хлороформ та інші), а також твердого носія (папір, силікагель, алюмінію оксид).

Особливе значення мають різновиди розподільної хроматографії - паперова і тонкошарова.

Розподільна хроматографія на папері. Цей спосіб ґрунтується на різному розподілі речовин між двома рідинами, що не змішуються.

Як носій нерухомої фази використовується хроматографічний папір, який утримує у своїх порах воду — нерухомий розчинник. При обробці паперу рухомим розчинником нанесені на папір речовини, що хроматографуються, переходять у рухому фазу і, рухаючись з різними швидкостями по капілярах паперу, розділяються, утворюючи хроматограму.

Паперова хроматографія розділяється на висхідну, низхідну і кругову. Висхідні хроматограми одержують під час пересування рухомого розчинника по порах паперу знизу вгору, низхідні — згори вниз. Найбільш швидким є круговий спосіб, але хроматографування висхідним і низхідним способами дає більш повне розділення компонентів.

Здатність речовини до пересування на папері характеризується величиною R_f , яка показує відношення швидкості руху речовини до швидкості руху розчинника.

А) Розподільна хроматографія в тонкому шарі сорбенту

Тонкошарова хроматографія є одним з найбільш зручних, швидких і достатньо точних методів розділення та ідентифікації органічних та неорганічних сполук.

Відрізняють тонкошарову хроматографію із закріпленням шаром сорбенту, коли сорбент закріплюється на пластинці за допомогою фіксатора і з незакріпленням шаром. Як сорбент використовують силікагель, алюмінію оксид та ін. Часто використовують готові пластинки для тонкошарової хроматографії із закріпленням шаром сорбенту. Хроматографування проводять у спеціальних хроматографічних камерах. Нанесення досліджуваних проб і хроматографування виконують аналогічно методу паперової хроматографії, відповідно наведеної далі методики хроматографічних визначень. Хроматографія в тонкому шарі сорбенту має ряд переваг перед паперовою хроматографією:

- можливість використання як нерухомих фаз різноманітних сорбентів;
- висока швидкість процесу хроматографування;
- можливість використання агресивних рухомих фаз, які взаємодіють з папером;
- можливість використання для проявлення хроматограм агресивних реагентів, які взаємодіють з папером.

Для кількісної оцінки здатності розділення речовин розраховують величини R_f . Щоб запобігти впливу будь-яких побічних факторів на значення величин R_f зазвичай використовують метод свідків. Свідки (стандартні речовини) хроматографують паралельно з пробкою досліджуваної речовини. Збіг значень R_f досліджуваних речовин і взятих як свідки дає можливість встановлювати тотожність речовин.

Метод ***осадової хроматографії*** ґрунтується на утворенні малорозчинних сполук компонентами суміші, що розділяють, з осадниками,

які знаходяться в порах твердого сорбенту, і на різниці в розчинності осадів, що утворюються.

Як сорбент (носії) використовують високодисперсні речовини, індиферентні до осадника і розчину, що хроматографується (алюмінію оксид, силікагель, крохмаль, папір та ін.).

Осадниками є речовини, які здатні реагувати з досліджуваним розчином з утворенням осадів різної розчинності. Хроматографування може проводитися в колонках, у тонкому шарі сорбенту і на папері.

Виявлення іонів в досліджуваній суміші зручно виконувати методом хроматографування на папері.

Іонообмінна хроматографія. Цей метод побудований на зворотному (стехіометричному) обміні іонів, які містяться в досліджуваному розчині, на іони, що входять до складу іонообмінника.

У залежності від здатності іонообмінника обмінювати катіони або аніони вони відповідно поділяються на катіоніти і аніоніти. Існують іоніти, що мають амфотерні властивості і здатні обмінювати і катіони, і аніони. Іонообмінники — органічні високомолекулярні сполуки, які обмежено набрякають у водних розчинах електролітів або в полярних розчинниках і містять іоногенні групи.

Від ступеня дисоціації іоногенних груп залежить ступінь кислотності або основності іоніту. У відповідності з цим розрізняють такі групи іонітів:

- сильнокислотні катіоніти, що містять сильнодисоційовані кислотні групи (сульфо-, фосфорнокислотні);
- слабокислотні катіоніти, що містять слабкодисоціюючі кислотні групи (карбоксильні, фенольні);
- високоосновні аніоніти, що містять четвертинні амонійні або піридинові угруповання;
- низькоосновні аніоніти, що містять первинні, вторинні, третинні аміногрупи.

Якість іонообмінних смол характеризується їх сорбційною ємністю і хімічною стійкістю.

Активність сорбенту (статичну або динамічну ємність) умовно характеризується кількістю електроліту, що поглинається одиницею маси або об'єму сорбенту.

Виконання завдання призначені для самоопрацювання та поглибленого вивчення окремих розділів дисципліни студентами I V курсу технологічних спеціальностей денної форми навчання.

Приклади розв'язання задач

Приклад 28. При визначенні адипінової кислоти в продукті гідрокарбоксілування бутадієну методом паперової хроматографії отримані плями, виявлені метиловим червоним, вирізали, висушили й зважили. Для стандартних сумішей з різним вмістом адипінової кислоти одержали дані:

Маса кислоти, мкг	5	10	15	20
Маса паперу із плямами, мг	61	106	146	186

Наважку досліджуваного зразка $m = 150$ мг розчинили в $V = 20$ мл води, і порції отриманого розчину по $0,05$ мл хроматографували. Маса отриманих плям склала $m_2 = 107$ мг. Визначити масову частку (%) адипінової кислоти в досліджуваному продукті.

Розв'язання. 1. За даними для стандартних сумішей будуюмо калібрувальний графік (рис.7).

2. Знаходимо масу досліджуваної кислоти в пробі $0,05$ мл - $10,1$ мкг.

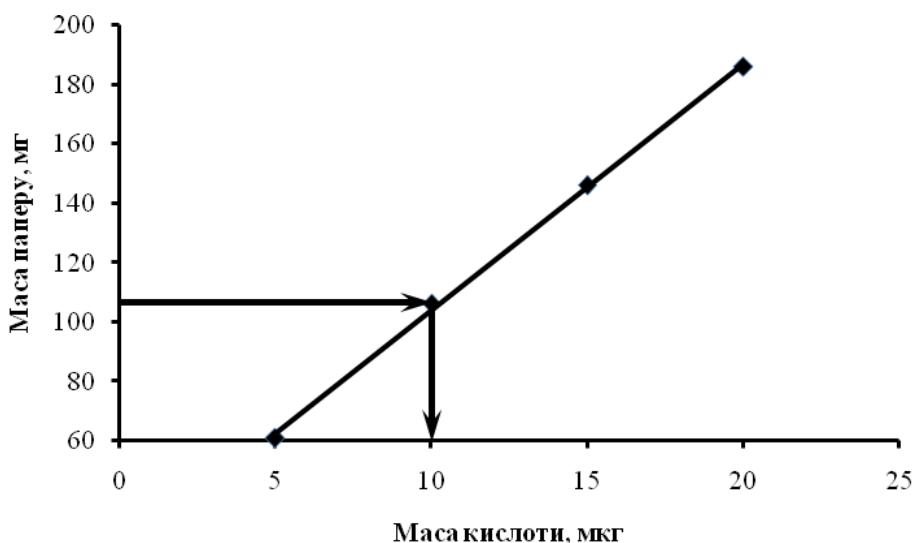


Рис. 7. Калібрувальний графік

3. Всього маса кислоти в 20 мл :

$$m_k = \frac{20 \cdot 10,1}{0,05} = 4040 \text{ мкг} = 40,4 \text{ мг}$$

4. Розрахуємо вміст адипінової кислоти у вихідному зразку:

$$x = \frac{100 \cdot 40,4}{150} = 26,93\%$$

Відповідь: вміст адипінової кислоти становить $26,93\%$.

Приклад 29. Для визначення динамічної ємності катіоніта через колонку, що містить 5 г катіоніту, пропустили 500 мл 0,05 н розчину кальцію. При визначенні кальцію в елюаті в порціях по 50 мл були отримані наступні значення концентрацій: 0,003; 0,008; 0,015; 0,025; 0,040; 0,050; і 0,050. Визначити динамічну ємність катіоніту.

Розв'язання.

1. Розрахуємо кількість еквівалентів Са, що поглинаються з кожної порції елюату:

$$I. \frac{(0,050 - 0,003) \cdot 50}{1000} = 0,00235 \text{ екв} = 2,35 \text{ мекв}$$

$$II. \frac{(0,050 - 0,008) \cdot 50}{1000} = 0,0021 \text{ екв} = 2,1 \text{ мекв}$$

$$III. \frac{(0,050 - 0,015) \cdot 50}{1000} = 0,00175 \text{ екв} = 1,75 \text{ мекв}$$

$$IV. \frac{(0,050 - 0,025) \cdot 50}{1000} = 0,00125 \text{ екв} = 1,25 \text{ мекв}$$

$$V. \frac{(0,050 - 0,040) \cdot 50}{1000} = 0,0005 \text{ екв} = 0,5 \text{ мекв}$$

2. Всього поглинено 5 г катіоніту:

$$2,35 + 2,1 + 1,75 + 1,25 + 0,5 = 7,95 \text{ мекв}$$

3. Звідси динамічна ємність дорівнює:

$$K = \frac{7,95}{5} = 1,59 \text{ мекв} / \text{г}$$

Відповідь: динамічна ємність катіоніту становить 1,59 мекв на 1 г катіоніту.

ЗАВДАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. При визначенні етилового спирту методом газової хроматографії виміряли висоту піків залежно від маси спирту і одержали наступні дані:

m , мг	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
h , мм	18	37	48	66	83

Для 0,02 г досліджуваного розчину отримали пік висотою 57 мм. Обчислити масову відсоткову частку (%) етилового спирту.

2. При визначенні фурфуролу в суміші методом газової хроматографії площу його піка $S_{\text{фурфуролу}}$ порівнювали із площею піка о-ксилола $S_{\text{ксилола}}$, що вводили як стандарт. Для стандартного зразка, що містить 25% фурфуролу, і досліджуваного зразка одержали наступні результати:

варіант	Стандартний зразок		Досліджуваний зразок	
	$S_{\text{фурфуролу}}$, мм ²	$S_{\text{ксилола}}$, мм ²	$S_{\text{фурфуролу}}$, мм ²	$S_{\text{ксилола}}$, мм ²
1	11	25	18,5	22
2	15	28	19,5	24
3	21	35	25	32

Прийняти k рівним одиниці для обох компонентів. Визначити масову відсоткову частку (%) фурфуролу в досліджуваному зразку.

3-5. Розрахувати масову відсоткову частку (%) компонентів газової суміші за наступними даними, отриманими методом газової хроматографії:

Варіант 3			Варіант 4			Варіант 5		
Газ	S , мм ²	k	Газ	S , мм ²	k	Газ	S , мм ²	k
Бензол	20,6	0,78	о-Ксилол	16,7	0,84	Бензол	85	1,0
Толуол	22,9	0,79	т-Ксилол	20,3	0,81	Гексан	27	1,1
Етилбензол	30,5	0,82	п-Ксилол	8,5	0,81	Пропилен	34	1,1
Кумол	16,7	0,84	Этилбензол	30,4	0,82	Этанол	11	1,8

6-8. Цис-1,2-діхлоретилен у вініліденхлориді визначили методом газової хроматографії, використовуючи толуол як внутрішній стандарт, і одержали наступні дані для градуйованого графіку:

S_x/S_t	0,72	0,90	1,08	1,28
ω , %	0,5	1,0	1,5	2,0

Розрахувати масову відсоткову частку (%) *цис*-1,2-діхлоретилену в досліджуваному зразку за наступними даними про піки обумовленої і стандартної речовини (прийняти $k = 1$):

Варіант	Пік <i>цис</i> -1, 2-діхлоретилен		Пік толуолу	
	основа	висота	основа	висота
6	18	35	15	52
7	14	42	18	45
8	12	60	15	50

9. Крізь стовпчик, заповнений катіонітом масою 10 г, пропустили 250,0 мл 0,08 М розчину CuSO_4 . Вихідні зі стовпчика порції розчину по 50,0 мл титрували 0,1 н. розчином тіосульфату натрію ($f_{\text{екв}} = 1$) і одержали наступні результати:

Порція розчину .	1	2	3	4	5
Витрата тіосульфату на титрування, мл	0	12,00	25,00	39,20	39,20

Обчислити динамічну ємність (ммоль/г) катіоніту по міді, якщо молярна маса еквівалента становить $M(1/2\text{Cu}^{2+})$.

10. Для визначення концентрації електроліту 10,00 мл розчину помістили в мірну колбу місткістю 100,0 мл, довели водою до мітки; 10,00 мл розчину пропустили через стовпчик з катіонітом у H^+ -формі. Елюат і промивні води зібрали в склянку і відтитрували потенціометричним методом на автотитраторі 0,1000 М розчином NaOH , затративши V (мл) розчину титранта.

Розрахувати концентрацію електроліту (г/л) за наступними даними:

Електроліт.....	KNO_3	NaNO_3	CuSO_4	NiSO_4
$V(\text{NaOH})$, мл.....	1,98	2,15	1,67	0,89

11. Розведений розчин міді концентрували, пропускаючи 50,0 мл цього розчину через хроматографічну колонку з катіонітом у H^+ -формі, промили колонку хлороводневою кислотою і розчин довели до мітки водою в мірній колбі місткістю 100,0 мл. Відібрали 20,00 мл розчину в мірну колбу місткістю 50,0 мл, додали 15 мл 25%-го NH_3 , довели до мітки водою й виміряли оптичну густину $A_x = 0,48$ при $\lambda = 590$ нм і $l = 2$ см.

За тих самих умов виміряли оптичну густину A_{cm} стандартного розчину, що містить 2 мг/мл Cu , помістили 10,00 мл розчину в мірну колбу місткістю 50,0мл, додали 15мл 25% -го NH_3 , довели до мітки водою і одержали $A_{\text{cm}} = 0,56$.

Визначити масу міді в досліджуваному розчині.

12-14. При визначенні адіпинової кислоти в продукті гідрокарбосилірування бутадієну методом паперової хроматографії отримані плями, виявлені метиловим червоним, вирізали, висушили і зважили. Для стандартних сумішей з різним вмістом адіпинової кислоти одержали дані:

Маса кислоти, мг	5	10	15	20
Маса паперу із плямою, мг	61	106	146	186

Наважку аналізованого зразка m_1 (мг) розчинили в V (мл) води і порції отриманого розчину по 0,05 мл хроматографували. Маса отриманих плям складала m_2 (мг).

Визначити масову відсоткову частку (%) адіпинової кислоти в аналізованому продукті за наступними даними:

Варіант.....	12	13	14
m_1 , мг.....	100	150	200
V , мл.....	10	20	25
m_2 , мг.....	85	107	165

15-20. Для хроматографічного визначення нікелю на папері, просоченої розчином диметилгліоксиму, приготували три стандартних розчини. Наважку $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ масою m (г) розчинили в мірній колбі місткістю 50,0 мл. Для побудови градуйованого графіку 5,00; 10,00 і 20,00 мл отриманого розчину розбавили водою до 50,0 мл. Аналізований розчин, що містить нікель, також розбавили водою до 50,0 мл і виміряли висоту піків, що утворилися при хроматографуванні:

Варіант	m , г	Висота піків, мм			
		h_1	h_2	h_3	h_x
15	0,2780	28,5	42,3	70,0	47,5
16	0,2200	22,5	39,0	71,5	65,0
17	0,3720	38,0	50,0	76,0	59,0
18	0,1950	20,0	35,0	65,0	53,0
19	0,2284	23,5	31,5	47,2	37,5
20	0,2480	25,5	37,5	61,3	49,0

Визначити масу (мг) нікелю в досліджуваному розчині.

ДОДАТКИ

Таблиця 1

НАЙВАЖЛИВІШІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ

Величина	Значення	Розмірність
Абсолютний нуль температури	-273,15	$^{\circ}\text{C}$
Потрійна точка води	0,01	$^{\circ}\text{C}$
Максимальна щільність води	999,973	кг/м^3
Щільність сухого повітря при нормальних умовах	1,2929	кг/м^3
Нормальні умови	$T=273,15^{\circ}\text{C}$, $P=101325 \text{ Па}$	
Гравітаційна стала, γ	$6,6720(41) \cdot 10^{-11}$	$\text{Н м}^2/\text{кг}^2$
Електрична стала, ϵ	$8,85418782(7) \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Стала Фарадея, F	$9,648456(27) \cdot 10^4$	Кл/моль
Прискорення вільного падіння, g	9,80665	м/с^2
Стала Больцмана, k	$1,380662(44) \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Число Авогадро, N_A	$6,0220943(61) \cdot 10^{23}$	$1/\text{моль}$
Універсальна газова стала, R	8,31441(26)	Дж/мольК
Об'єм одного моля ідеального газу при нормальних умовах, V_0	0,02241383(70)	$\text{м}^3/\text{моль}$
Атомна одиниця маси, а.о.м.	$1,6605655(86) \cdot 10^{-27}$	Кг
Елементарний заряд, e	$1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$	Кл
Швидкість світла у вакуумі, c	299792458(1,2)	м/с

Цифри в дужках означають погрішність визначення величини в останніх знаках.

Таблиця 2

Формули для розрахунку рН

Електроліт	Приклад	Формула для розрахунку рН
Сильна кислота	HNO_3	$-\lg C_{\text{кисл}}$
Сильна основа	NaOH	$14 - \lg C_{\text{осн}}$
Слабка кислота	HCN	$1/2 \text{pK}_{\text{кисл}} - 1/2 \lg C_{\text{кисл}}$
Слабка основа	NH_4OH	$14 - 1/2 \text{pK}_{\text{осн}} + 1/2 \lg C_{\text{осн}}$
Суміш слабкої кислоти та її солі	$\text{HCN} + \text{NaCN}$	$\text{pK}_{\text{кисл}} - \lg (C_{\text{кисл}} / C_{\text{соли}})$
Суміш слабкої основи та її солі	$\text{NH}_4\text{OH} + \text{NH}_4\text{Cl}$	$14 - \text{pK}_{\text{осн}} + \lg (C_{\text{осн}} / C_{\text{соли}})$
Сіль слабкої основи та сильної кислоти	$\text{NH}_4\text{OH} + \text{HCl}$	$7 - 1/2 \text{pK}_{\text{осн}} - 1/2 \lg C_{\text{соли}}$
Сіль слабкої кислоти та сильної основи	$\text{HCN} + \text{NaOH}$	$7 + 1/2 \text{pK}_{\text{кисл}} + 1/2 \lg C_{\text{соли}}$
Сіль слабкої основи та слабкої кислоти	NH_4CN	$7 + 1/2 \text{pK}_{\text{кисл}} - 1/2 \text{pK}_{\text{осн}}$

Таблиця 3

Густина водних розчинів кислот та основ

Нітратна кислота			
ρ, г/мл	Концентрація		
	%	моль/л	г/л
1	2	3	4
1,000	0,3296	0,0523	3,295
1,005	1,255	0,2001	12,61
1,010	2,164	0,3468	21,85
1,015	3,073	0,4950	31,19
1,020	3,982	0,6445	40,61
1,025	4,883	0,7943	50,05
1,030	5,784	0,9454	59,57
1,035	6,661	1,094	68,93
1,040	7,530	1,243	78,32
1,045	8,398	1,393	87,77
1,050	9,259	1,543	97,22
1,055	10,12	1,694	106,7

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,060	10,97	1,845	116,3
1,065	11,81	1,997	125,8
1,070	12,65	2,148	135,3
1,080	14,31	2,453	154,6
1,085	15,13	2,605	164,1
1,090	15,95	2,759	173,8
1,095	16,76	2,913	183,5
1,100	17,58	3,068	193,3
1,105	18,39	3,224	203,1
1,110	19,19	3,381	213,0
1,115	20,00	3,539	223,0
1,120	20,79	3,696	232,9
1,125	21,59	3,854	242,8
1,130	22,38	4,012	252,8
1,135	23,16	4,171	262,8
1,140	23,94	4,330	272,8
1,145	24,71	4,489	282,9
1,150	25,48	4,649	292,9
1,155	26,24	4,810	303,1
1,160	27,00	4,970	313,2
1,165	27,76	5,132	323,4
1,170	28,51	5,293	333,5
1,175	29,25	5,455	343,7
1,180	30,00	5,618	354,0
1,185	30,74	5,780	364,2
1,190	31,47	5,943	374,5
1,195	32,21	6,110	385,0
1,200	32,94	6,273	395,3
1,205	33,68	6,440	405,8
1,210	34,41	6,607	416,3
1,215	35,16	6,778	427,1
1,220	35,93	6,956	438,3
1,225	36,70	7,135	449,6
1,230	37,48	7,315	460,9

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,235	38,25	7,497	472,4
1,240	39,02	7,679	483,8
1,245	39,80	7,861	495,5
1,250	40,58	8,049	507,2
1,255	41,36	8,237	519,0
1,260	42,14	8,426	530,9
1,265	42,92	8,616	542,9
1,270	43,70	8,808	555,0
1,275	44,48	9,001	567,2
1,285	46,06	9,394	591,9
1,290	46,85	9,590	604,3
1,295	47,63	9,789	616,8
1,300	48,42	9,990	629,5
1,305	49,21	10,19	642,1
1,310	50,00	10,39	654,7
Сульфатна кислота			
1,000	0,261	0,0266	2,608
1,005	0,986	0,1010	9,906
1,010	1,731	0,1783	17,49
1,015	2,485	0,2595	25,45
1,020	3,242	0,3372	33,07
1,025	4,000	0,4180	41,99
1,030	4,746	0,4983	48,87
1,035	5,493	0,5796	56,85
1,040	6,237	0,6613	64,86
1,045	6,956	0,7411	72,69
1,050	7,704	0,8250	80,92
1,055	8,415	0,9054	88,80
1,060	9,129	0,9856	96,67
1,065	9,843	1,066	104,6
1,070	10,56	1,152	113,0
1,075	11,26	1,235	121,1
1,080	11,96	1,317	129,2
1,085	12,66	1,401	137,4

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,090	13,36	1,484	145,6
1,095	14,04	1,567	153,7
1,100	14,73	1,652	162,0
1,105	15,41	1,735	170,2
1,110	16,08	1,820	178,5
1,115	16,76	1,905	186,8
1,120	17,43	1,990	195,2
1,125	18,09	2,075	203,5
1,130	18,76	2,161	211,9
1,135	19,42	2,247	220,4
1,140	20,08	2,334	228,9
1,145	20,73	2,420	237,4
1,150	21,38	2,507	245,9
1,155	22,03	2,594	254,4
1,160	22,67	2,681	263,0
1,165	23,31	2,768	271,6
1,170	23,95	2,857	280,2
1,175	24,58	2,945	288,8
1,180	25,21	3,033	297,5
1,185	25,84	3,122	306,2
1,190	26,47	3,211	314,9
1,195	27,10	3,302	323,9
1,200	27,72	3,391	332,6
1,205	28,33	3,481	341,4
1,210	28,95	3,572	350,3
1,215	29,57	3,663	359,3
1,220	30,18	3,754	368,2
1,225	30,79	3,846	377,2
1,230	31,40	3,938	386,2
1,235	32,01	4,031	395,4
1,240	32,61	4,123	404,4
1,245	33,22	4,216	413,5
1,250	33,82	4,310	422,7
1,255	34,42	4,404	431,9

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,260	35,01	4,498	441,2
1,265	35,60	4,592	450,4
1,270	36,19	4,686	459,6
1,275	36,78	4,781	468,9
1,280	37,36	4,876	478,2
1,285	37,95	4,972	487,6
1,290	38,53	5,068	497,1
1,295	39,10	5,163	506,4
1,300	39,68	5,259	515,8
1,305	40,25	5,356	525,3
1,310	40,82	5,452	534,7
1,315	41,39	5,549	544,2
1,320	41,95	5,646	553,8
1,325	42,51	5,743	563,3
1,330	43,07	5,840	572,8
1,335	43,62	5,938	582,4
1,340	44,17	6,035	591,9
1,345	44,72	6,132	601,4
1,350	45,26	6,229	610,9
1,355	45,80	6,327	620,6
1,360	46,33	6,424	630,1
1,365	46,86	6,522	639,7
1,370	47,39	6,620	649,3
1,375	47,92	6,718	658,9
1,380	48,45	6,817	668,6
1,385	48,97	6,915	678,2
1,390	49,48	7,012	687,7
1,395	49,99	7,110	697,3
1,400	50,50	7,208	707,0
Хлоридна кислота			
1,000	0,360	0,099	3,60
1,005	1,360	0,375	13,65
1,010	2,364	0,655	23,87
1,015	3,374	0,939	34,24

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,020	4,388	1,227	44,74
1,025	5,408	1,520	55,42
1,030	6,433	1,817	66,25
1,035	7,464	2,118	77,22
1,040	8,490	2,421	88,27
1,045	9,510	2,725	99,35
1,050	10,52	3,029	110,4
1,055	11,52	3,333	121,5
1,060	12,51	3,638	132,6
1,065	13,50	3,944	143,8
1,070	14,49	4,253	155,1
1,075	15,48	4,565	166,4
1,080	16,47	4,878	177,8
1,085	17,45	5,192	189,3
1,090	18,43	5,509	200,9
1,095	19,41	5,829	212,5
1,100	20,39	6,150	224,2
1,105	21,36	6,472	236,0
1,110	22,33	6,796	247,8
1,115	23,29	7,122	259,7
1,120	24,25	7,449	271,6
1,125	25,22	7,782	283,7
1,130	26,20	8,118	296,0
1,135	27,18	8,459	308,4
1,140	28,18	8,809	321,2
1,145	29,17	9,159	333,9
1,150	30,14	9,505	346,6
1,155	31,14	9,863	359,6
1,160	32,14	10,22	372,8
1,165	33,16	10,59	386,3
1,170	34,18	10,97	399,9
1,175	35,20	11,34	413,6
1,180	36,23	11,73	427,7
1,185	37,27	12,11	441,6

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,190	38,32	12,50	455,8
1,195	39,37	12,90	470,5
1,198	40,00	13,14	479,1
Калій гідроксид			
1,000	0,197	0,035	1,964
1,005	0,743	0,133	7,463
1,010	1,295	0,233	13,07
1,015	1,84	0,333	18,68
1,020	2,38	0,433	24,30
1,025	2,93	0,536	30,07
1,030	3,48	0,639	35,85
1,035	4,03	0,744	41,75
1,040	4,58	0,848	47,58
1,045	5,12	0,954	53,53
1,050	5,66	1,06	59,48
1,060	6,74	1,27	71,26
1,070	7,82	1,49	83,60
1,080	8,89	1,71	95,95
1,090	9,96	1,94	108,9
1,100	11,03	2,16	121,2
1,110	12,08	2,39	134,1
1,120	13,14	2,62	147,0
1,130	14,19	2,86	160,5
1,140	15,22	3,09	173,4
1,150	16,26	3,33	186,8
1,160	17,29	3,58	200,9
1,170	18,32	3,82	214,3
1,180	19,35	4,07	228,4
1,190	20,37	4,32	242,4
1,200	21,38	4,57	256,4
1,210	22,38	4,83	271,0
1,220	23,38	5,08	285,0
1,230	24,37	5,34	299,6
1,240	25,36	5,60	314,2

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,250	26,34	5,87	329,4
1,260	27,32	6,13	344,0
1,270	28,89	6,40	359,1
1,280	29,25	6,67	374,3
1,290	30,21	6,95	390,0
1,300	31,15	7,22	405,1
1,310	32,09	7,49	420,3
1,320	33,03	7,77	436,0
1,330	33,97	8,05	451,7
1,340	34,90	8,33	467,7
1,350	35,82	8,62	483,7
1,360	36,73	8,90	499,4
1,370	37,65	9,19	515,7
1,380	38,56	9,48	531,9
1,390	39,46	9,78	548,8
1,400	40,37	10,07	565,0
1,410	41,26	10,37	581,9
1,420	42,15	10,67	598,7
1,430	43,04	10,97	615,5
1,440	43,92	11,28	632,9
1,450	44,79	11,58	649,7
1,460	45,66	11,88	666,6
1,470	46,53	12,19	684,0
1,480	47,39	12,50	701,4
1,490	48,25	12,82	719,3
1,500	49,10	13,13	736,7
1,510	49,95	13,45	754,7
1,520	50,80	13,76	772,1
Натрій гідроксид			
1,000	0,159	0,0398	1,592
1,005	0,602	0,151	6,040
1,010	1,04	0,264	10,56
1,020	1,94	0,494	19,76
1,030	2,84	0,731	29,24

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,040	3,74	0,971	38,84
1,050	4,65	1,222	48,88
1,060	5,56	1,474	58,96
1,070	6,47	1,731	69,24
1,080	7,38	1,992	79,68
1,090	8,28	2,257	90,28
1,100	9,19	2,527	101,1
1,110	10,10	2,802	112,1
1,120	11,01	3,082	123,3
1,130	11,92	3,367	134,7
1,140	12,83	3,655	146,2
1,150	13,73	3,947	157,9
1,160	14,64	4,244	169,8
1,170	15,54	4,545	181,8
1,180	16,44	4,850	194,0
1,190	17,34	5,160	206,4
1,200	18,25	5,476	219,0
1,210	19,16	5,796	231,8
1,220	20,07	6,122	244,9
1,230	20,98	6,451	258,0
1,240	21,90	6,788	271,5
1,250	22,82	7,129	285,2
1,260	23,73	7,475	299,0
1,270	24,64	7,824	313,0
1,280	25,56	8,178	327,1
1,290	26,48	8,539	341,6
1,300	27,41	8,906	356,2
1,310	28,33	9,278	371,1
1,320	29,26	9,656	386,2
1,330	30,20	10,04	401,6
1,340	31,14	10,43	417,2
1,350	32,10	10,83	433,2
1,360	33,06	11,24	449,6
1,370	34,03	11,65	466,0

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
1,380	35,01	12,08	483,2
1,390	36,00	12,51	500,4
1,400	36,99	12,95	518,0
1,410	37,99	13,39	535,6
1,420	38,99	13,84	553,6
1,430	40,00	14,30	572,0
1,440	41,03	14,77	590,8
1,450	42,07	15,25	610,0
1,460	43,12	15,74	629,6
1,470	44,17	16,23	649,2
1,480	45,22	16,73	669,2
1,490	46,27	17,23	689,2
1,500	47,33	17,75	710,0
1,510	48,38	18,26	730,4
Амоніак			
0,998	0,0465	0,0273	0,46
0,996	0,512	0,299	5,1
0,994	0,977	0,570	9,7
0,992	1,43	0,834	14,2
0,990	1,89	1,10	18,7
0,988	2,35	1,36	23,3
0,986	2,82	1,63	27,8
0,984	3,30	1,91	32,5
0,982	3,78	2,18	37,1
0,980	4,27	2,46	41,8
0,978	4,76	2,73	46,4
0,976	5,25	3,01	51,2
0,974	5,79	3,29	55,9
0,972	6,25	3,57	60,7
0,970	6,75	3,84	65,3
0,968	7,26	4,12	70,0
0,966	7,77	4,41	75,1
0,964	8,29	4,69	79,9
0,962	8,82	4,98	84,7

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
0,960	9,34	5,27	89,6
0,958	9,87	5,55	94,4
0,956	10,40	5,84	99,3
0,954	10,95	6,13	104,2
0,952	11,49	6,42	109,1
0,950	12,03	6,71	114,1
0,948	12,58	7,00	119,0
0,946	13,14	7,29	124,0
0,944	13,71	7,60	129,2
0,942	14,29	7,91	134,5
0,940	14,88	8,21	139,6
0,938	15,47	8,52	144,8
0,936	16,06	8,83	150,1
0,934	16,55	9,13	155,2

Таблиця 4

Константи іонізації важливіших кислот

Назва	Формула	K_a	pK_a
1	2	3	4
Адипинова K_1 K_2	$HOOC(CH_2)_4COOH$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	4,41
		$3,9 \cdot 10^{-6}$	5,41
Азотиста (нітритна)	HNO_2	$5,1 \cdot 10^{-4}$	3,29
Азіводнева	HN_3	$2,0 \cdot 10^{-5}$	4,70
Азотноватиста K_1 K_2	$H_2N_2O_2$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	7,21
		$2,9 \cdot 10^{-12}$	11,54
Акрилова	$CH_2=CHCOOH$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	4,26
α -Амінопропіонова (α -Аланін)	$CH_3CH(NH_2)COOH$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	9,89
β -Амінопропіонова (β -Аланін)	$NH_2(CH_2)_2COOH$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	10,58
Амінооцтова (Гліцин)	NH_2CH_2COOH	$1,7 \cdot 10^{-10}$	9,77
Аскорбиновая K_1 K_2	$H_2C_6H_6O_6$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	4,04 11,34
		$4,6 \cdot 10^{-12}$	

Продовження таблиці 4

1	2	3	4
Арсенатна	K_1	$5,6 \cdot 10^{-3}$	2,25
	K_2	$1,7 \cdot 10^{-7}$	6,77
	K_3	$2,95 \cdot 10^{-12}$	11,53
Арсенітна	H_3AsO_3	$5,9 \cdot 10^{-10}$	9,23
Бензойна	C_6H_5COOH	$6,3 \cdot 10^{-5}$	4,20
Борна (орто-)	K_1	$7,1 \cdot 10^{-10}$	9,15
	K_2	$1,8 \cdot 10^{-13}$	12,74
	K_3	$1,6 \cdot 10^{-14}$	13,80
Борна(тетра-)	K_1	$1,8 \cdot 10^{-4}$	3,74
	K_2	$2,0 \cdot 10^{-8}$	7,70
Бромноватиста (гипоброматна)	$HBrO$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	8,66
Валеріанова (норм.)	$CH_3(CH_2)_3COOH$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	4,86
Валеріанова (ізо-)	$(CH_3)_2CHCH_2COOH$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	4,76
Ванадатна (орто-)	K_1	$1,8 \cdot 10^{-4}$	3,74
	K_2	$3,2 \cdot 10^{-10}$	9,5
	K_3	$4,0 \cdot 10^{-15}$	14,4
Винна	K_1	$9,1 \cdot 10^{-4}$	3,04
	K_2	$4,3 \cdot 10^{-5}$	4,37
Вольфраматна	K_1	$6,3 \cdot 10^{-3}$	2,20
	K_2	$2,0 \cdot 10^{-4}$	3,70
Гексаціаноферратна	K_3	$5,6 \cdot 10^{-3}$	2,25
	K_4	$6,0 \cdot 10^{-5}$	4,22
Галлова	$C_6H_2(OH)_3COOH$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	4,41
Германієва	K_1	$7,9 \cdot 10^{-10}$	9,10
	K_2	$2,0 \cdot 10^{-13}$	12,7
Гидрогенсульфітна (дитіониста)	K_1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	0,30
	K_2	$3,2 \cdot 10^{-3}$	2,50
Гидрохинон	$C_6H_4(OH)_2$ (1,4)	$1,1 \cdot 10^{-10}$	9,96
Гликолева	$CH_2(OH)COOH$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	3,88
Глицеринова	$CH_2(OH)CH(OH)COOH$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	3,52
Глутамінова	K_1	$4,7 \cdot 10^{-5}$	4,33
	K_2	$8,7 \cdot 10^{-11}$	10,06

Продовження таблиці 4

1		2	3	4
Глутарова	K_1	$\text{HOOC}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	4,34
	K_2		$5,4 \cdot 10^{-6}$	5,27
Глюконова		$\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COOH}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	3,86
Димолибдатна		$\text{H}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$	$9,55 \cdot 10^{-6}$	5,02
Дихроматна	K_2	$\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	1,64
Дитіоновою	K_1	$\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_6$	$6,3 \cdot 10^{-1}$	0,2
	K_2		$4,0 \cdot 10^{-4}$	3,4
Дихлороцтова		CHCl_2COOH	$5,0 \cdot 10^{-2}$	1,30
Етилендіамінтетра-оцтова	K_1	$\text{H}_4\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_8\text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2,00
	K_2		$2,1 \cdot 10^{-3}$	2,67
	K_3		$6,9 \cdot 10^{-7}$	6,16
	K_4		$5,5 \cdot 10^{-11}$	10,26
Іодна (періодатна)	K_1	$\text{HIO}_4; \text{H}_5\text{IO}_6$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	1,61
	K_2		$4,3 \cdot 10^{-9}$	8,33
	K_3		$1,0 \cdot 10^{-15}$	15,0
Іодновата (іодатна)		HIO_3	$1,7 \cdot 10^{-1}$	0,77
Іодноватиста (гіпоіодитна)		HIO	$2,3 \cdot 10^{-11}$	10,64
Карбонатна	K_1	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	6,35
	K_2		$4,8 \cdot 10^{-11}$	10,32
Коричная (транс-)		$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CHCOOH}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	4,43
Корична (цис-)		$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CHCOOH}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	3,88
<i>m</i> -Крезол		$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$ (1,3)	$8,1 \cdot 10^{-11}$	10,09
<i>o</i> -Крезол		$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$ (1,2)	$6,3 \cdot 10^{-11}$	10,20
<i>n</i> -Крезол		$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$ (1,4)	$5,5 \cdot 10^{-11}$	10,26
Лимонна	K_1	$\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	3,13
	K_2		$2,2 \cdot 10^{-5}$	4,66
	K_3		$4,0 \cdot 10^{-7}$	6,40
Малеїнова	K_1	$\text{HOOCCH}=\text{CHCOOH}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	1,92
	K_2		$6,0 \cdot 10^{-7}$	6,22
Малоновою	K_1	$\text{HOOCCH}_2\text{COOH}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	1,38
	K_2		$2,1 \cdot 10^{-6}$	5,68

Продовження таблиці 4

1	2	3	4
Манганатна K_1 K_2	H_2MnO_4	$\sim 10^{-1}$ $7,1 \cdot 10^{-11}$	~ 1 10,15
Масляна (норм.)	$CH_3CH_2CH_2COOH$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	4,82
Масляная (ізо-)	$(CH_3)_2CHCOOH$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	4,86
Миндальна	$C_6H_5CH(OH)COOH$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	3,37
Молибдатна K_1 K_2	H_2MoO_4	$2,9 \cdot 10^{-3}$ $1,4 \cdot 10^{-4}$	2,54 3,86
Молочная	$CH_3CH(OH)COOH$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	3,83
Мурашина (форміатна)	$HCOOH$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	3,75
о-Нітробензойна	$NO_2C_6H_4COOH$ (1,2)	$6,8 \cdot 10^{-3}$	2,17
м-Нітробензойна	$NO_2C_6H_4COOH$ (1,3)	$3,5 \cdot 10^{-4}$	3,49
п-Нітробензойна	$NO_2C_6H_4COOH$ (1,4)	$3,7 \cdot 10^{-4}$	3,43
Оксалатна K_1 K_2	$H_2C_2O_4$	$5,6 \cdot 10^{-2}$ $5,4 \cdot 10^{-5}$	1,25 4,27
8-Осихинолін	C_9H_7ON	$1,3 \cdot 10^{-10}$	9,90
Оцтова (етанова)	CH_3COOH	$1,74 \cdot 10^{-5}$	4,76
Пероксид водню	H_2O_2	$2,0 \cdot 10^{-12}$	11,70
Пикринова	$HOOC_6H_2(NO_2)_3$	$4,2 \cdot 10^{-1}$	0,38
Пірокатехін K_1 K_2	$C_6H_4(OH)_2$ (1,2)	$3,6 \cdot 10^{-10}$ $1,6 \cdot 10^{-13}$	9,45 12,80
Пропіонова	CH_3CH_2COOH	$1,3 \cdot 10^{-5}$	4,87
Резорцин K_1 K_2	$C_6H_4(OH)_2$ (1,3)	$5,0 \cdot 10^{-10}$ $8,7 \cdot 10^{-12}$	9,30 11,06
Саліцилова	$C_6H_4(OH)COOH$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,97
Себацінова K_1 K_2	$HOOC(CH_2)_8COOH$	$4,0 \cdot 10^{-5}$ $6,0 \cdot 10^{-6}$	4,40 5,22
Селенітна K_1 K_2	H_2SeO_3	$1,8 \cdot 10^{-3}$ $3,2 \cdot 10^{-9}$	2,75 8,50
Селенідна K_1 K_2	H_2Se	$1,3 \cdot 10^{-4}$ $1,0 \cdot 10^{-11}$	3,89 11,00
Селенатна K_2	H_2SeO_4	$1,2 \cdot 10^{-2}$	1,92
Силікатна (орто) K_1 K_2	H_4SiO_4	$1,3 \cdot 10^{-10}$ $1,6 \cdot 10^{-12}$	9,9 11,8

	K_3		$2,0 \cdot 10^{-14}$	13,7
Сульфатна	K_2	H_2SO_4	$1,15 \cdot 10^{-2}$	1,94
Сульфїтна	K_1	H_2SO_3	$1,4 \cdot 10^{-2}$	1,85
	K_2		$6,2 \cdot 10^{-8}$	7,20
Сульфїдна	K_1	H_2S	$1,0 \cdot 10^{-7}$	6,99
	K_2		$2,5 \cdot 10^{-13}$	12,60
Синильна (ціанатна)		HCN	$5,0 \cdot 10^{-10}$	9,30
Сульфамїнова		H_2NSO_3H	$1,01 \cdot 10^{-1}$	0,99
Сульфанїлова		$H_2NC_6H_4SO_3H$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	3,20
Сульфосалїцилова	K_2	$C_6H_3(OH)(COOH)SO_3H$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	2,51
	K_3		$2,0 \cdot 10^{-12}$	11,70
Стибатна		$H[Sb(OH)_6]$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	4,40
Теллуритна	K_1	H_2TeO_3	$2,7 \cdot 10^{-3}$	2,57
	K_2		$1,8 \cdot 10^{-8}$	7,74
Теллуководнева	K_1	H_2Te	$2,3 \cdot 10^{-3}$	2,64
	K_2		$6,9 \cdot 10^{-13}$	12,06
Теллуратна	K_1	H_6TeO_6	$2,45 \cdot 10^{-8}$	7,61
	K_2		$1,1 \cdot 10^{-11}$	10,95
	K_3		$1 \cdot 10^{-15}$	15
Тїосульфатна	K_1	$H_2S_2O_3$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	0,60
	K_2		$1,9 \cdot 10^{-2}$	1,72
Трихлороцтова		CCl_3COOH	$2,0 \cdot 10^{-1}$	0,70
Фенол		C_6H_5OH	$1,0 \cdot 10^{-10}$	10,0
Фосфїтна	K_1	H_3PO_3	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1,80
	K_2		$2,0 \cdot 10^{-7}$	6,79
Фосфатна (орто-)	K_1	H_3PO_4	$7,1 \cdot 10^{-3}$	2,15
	K_2		$6,2 \cdot 10^{-8}$	7,21
	K_3		$5,0 \cdot 10^{-13}$	12,30
Фосфатна (пиро-)	K_1	$H_4P_2O_7$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,91
	K_2		$7,9 \cdot 10^{-3}$	2,10
	K_3		$2,0 \cdot 10^{-7}$	6,70
	K_4		$4,8 \cdot 10^{-10}$	9,32
Фосфорновата	K_1	$H_4P_2O_6$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	2,20
	K_2		$1,6 \cdot 10^{-3}$	2,81
	K_3		$5,4 \cdot 10^{-8}$	7,27

	K_4		$9,3 \cdot 10^{-11}$	10,03
Фосфорноватиста		H_3PO_2	$5,9 \cdot 10^{-2}$	1,23
<i>o</i> -Фталева	K_1	$C_6H_4(COOH)_2$ (1,2)	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,93
	K_2		$3,9 \cdot 10^{-6}$	5,41
<i>m</i> -Фталева	K_1	$C_6H_4(COOH)_2$ (1,3)	$2,0 \cdot 10^{-4}$	3,70
	K_2		$2,5 \cdot 10^{-5}$	4,60
<i>n</i> -Фталева	K_1	$C_6H_4(COOH)_2$ (1,4)	$2,9 \cdot 10^{-4}$	3,54
	K_2		$3,5 \cdot 10^{-5}$	4,46
Фтороводнева (фторидна)		HF	$6,2 \cdot 10^{-4}$	3,21
Фторофосфатна	K_1	$H_2[PO_3F]$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	0,55
	K_2		$1,6 \cdot 10^{-5}$	4,80
Фумарова	K_1	HOOCCH=CHCOOH	$9,3 \cdot 10^{-4}$	3,03
	K_2		$4,2 \cdot 10^{-5}$	4,38
Хлориста (хлоритна)		$HClO_2$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1,97
Хлорноватиста (Гипохлоритна)		HClO	$2,95 \cdot 10^{-8}$	7,53
Хлороцтова		$CH_2ClCOOH$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	2,86
Хроматна	K_1	H_2CrO_4	$1,6 \cdot 10^{-1}$	0,98
	K_2		$3,2 \cdot 10^{-7}$	6,50
Хромотропова	K_1	$C_{10}H_6(OH)_2(SO_3H)_2$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	5,36
	K_2		$2,5 \cdot 10^{-16}$	15,60
Цианова		HO-CN	$2,7 \cdot 10^{-4}$	3,57
Яблучна	K_1	$H_2C_4H_4O_5$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	3,46
	K_2		$8,9 \cdot 10^{-6}$	5,05
Янтарна	K_1	HOOCCH ₂ CH ₂ COOH	$1,6 \cdot 10^{-5}$	4,21
	K_2		$2,3 \cdot 10^{-6}$	5,63

Таблиця 5

Константи іонізації важливіших основ

Назва	Формула	К _б	рК _б
1	2	3	4
Амоніак розчин	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	4,755
Анілін	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$	9,37
Барій гідроксид K_2	$\text{Ba}(\text{OH})_2$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	0,64
Бензидин K_1 K_2	$\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$9,3 \cdot 10^{-10}$	9,03
	$\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_3^+ + \text{H}_2\text{O}$	$5,6 \cdot 10^{-11}$	10,25
Гідразин	$\text{N}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$	6,03
Гідроксиламін	$\text{NH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	8,05
Гуанідін	$(\text{H}_2\text{N})_2\text{CNH} + \text{H}_2\text{O}$	$3,55 \cdot 10^{-1}$	0,55
Диметиламін	$(\text{CH}_3)_2\text{NH} + \text{H}_2\text{O}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	3,27
Дифениламін	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH} + \text{H}_2\text{O}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$	13,21
Диетиламін	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH} + \text{H}_2\text{O}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	2,91
Кальцій гідроксид K_2	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	1,40
Літій гідроксид	LiOH	$6,8 \cdot 10^{-1}$	0,17
Метиламін	$\text{CH}_3\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	3,34
Сечовина	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$	13,82
1-Нафтиламін	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$8,4 \cdot 10^{-11}$	10,08
2-Нафтиламін	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	9,89
8-Осихинолін	$\text{C}_9\text{H}_7\text{ON} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	8,99
Пиридин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{N} + \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	8,82
Плюмбум гідроксид K_1 K_2	$\text{Pb}(\text{OH})_2$	$9,55 \cdot 10^{-4}$	3,02
		$3,0 \cdot 10^{-8}$	7,52
Семикарбазид	$\text{H}_2\text{NCONHNH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	10,57
Аргентум гідроксид	AgOH	$5,0 \cdot 10^{-3}$	2,30
Тіосечовина	$\text{CS}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	11,97
Триметиламін	$(\text{CH}_3)_3\text{N} + \text{H}_2\text{O}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	4,19
Уротропин	$(\text{CH}_2)_6\text{N}_4 + \text{H}_2\text{O}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	8,87
Фенилгідразин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	8,80
Хинолін	$\text{C}_9\text{H}_7\text{N} + \text{H}_2\text{O}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$	9,13
Етаноламін	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	4,75
Етиламін	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	3,19
Етилендіамін K_1 K_2	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{—CH}_2\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	3,92
		$9,8 \cdot 10^{-8}$	7,01

Таблиця 6

ДОБУТОК РОЗЧИННОСТІ

Формула речовини	ДР	Формула речовини	ДР
1	2	3	4
Ag_3AsO_3	$1 \cdot 10^{-17}$	Ag_3AsO_4	$1 \cdot 10^{-22}$
AgBO_2	$4 \cdot 10^{-3}$	Ag_2SO_4	$1,6 \cdot 10^{-5}$
AgBr	$5,3 \cdot 10^{-13}$	AgSeCN	$4,0 \cdot 10^{-16}$
AgBrO_3	$5,5 \cdot 10^{-5}$	Ag_2SeO_3	$9,8 \cdot 10^{-16}$
$\text{AgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	$4 \cdot 10^{-3}$	Ag_2SeO_4	$5,6 \cdot 10^{-8}$
AgCN	$1,4 \cdot 10^{-16}$	AgVO_3	$5 \cdot 10^{-7}$
Ag_2CO_3	$1,2 \cdot 10^{-12}$	Ag_2WO_4	$5,5 \cdot 10^{-12}$
$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$	$3,5 \cdot 10^{-11}$	AlAsO_4	$1,6 \cdot 10^{-16}$
AgCl	$1,78 \cdot 10^{-10}$	Al(OH)_3	$3,2 \cdot 10^{-34}$
AgClO_2	$2 \cdot 10^{-4}$	AlPO_4	$5,75 \cdot 10^{-19}$
AgClO_3	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$	$7,8 \cdot 10^{-51}$
Ag_2CrO_4	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ba(BrO}_3)_2$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
$\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	$1 \cdot 10^{-10}$	BaCO_3	$4,0 \cdot 10^{-10}$
$\text{Ag}_3\text{Fe(CN)}_6$	$1 \cdot 10^{-22}$	BaC_2O_4	$1,1 \cdot 10^{-7}$
$\text{Ag}_4\text{Fe(CN)}_6$	$8,5 \cdot 10^{-45}$	BaCrO_4	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Ag_2HVO_4	$2 \cdot 10^{-14}$	BaF_2	$1,1 \cdot 10^{-6}$
AgI	$8,3 \cdot 10^{-17}$	$\text{Ba}_2\text{Fe(CN)}_6$	$3 \cdot 10^{-8}$
AgIO_3	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$\text{Ba(IO}_3)_2$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
AgMnO_4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	BaMnO_4	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Ag_2MoO_4	$2,8 \cdot 10^{-9}$	BaMoO_4	$4 \cdot 10^{-8}$
AgN_3	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$	$6 \cdot 10^{-39}$
AgNO_2	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$\text{Ba}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$3 \cdot 10^{-11}$
$\text{Ag}_2\text{O (Ag}^+, \text{OH}^-)$	$1,95 \cdot 10^{-8}$	BaSO_3	$8 \cdot 10^{-7}$
AgOCN	$2,3 \cdot 10^{-7}$	BaSO_4	$1,1 \cdot 10^{-10}$
Ag_3PO_4	$1,3 \cdot 10^{-20}$	BaS_2O_3	$1,6 \cdot 10^{-5}$
AgReO_4	$7,95 \cdot 10^{-5}$	BaSeO_4	$5 \cdot 10^{-8}$
Ag_2S	$6,3 \cdot 10^{-50}$	BeCO_3	$1 \cdot 10^{-3}$
AgSCN	$1,1 \cdot 10^{-12}$	BeMoO_4	$3,2 \cdot 10^{-12}$
Ag_2SO_3	$1,5 \cdot 10^{-14}$	Be(OH)_2	$4,9 \cdot 10^{-22}$
AgSO_3NH_2	$1 \cdot 10^{-1}$	BiAsO_4	$2,8 \cdot 10^{-10}$

Продовження таблиці 6

1	2	3	4
BiI_3	$8,1 \cdot 10^{-19}$	Ce(OH)_3	$1,5 \cdot 10^{-20}$
Bi(OH)_3	$3,2 \cdot 10^{-32}$	CoCO_3	$1,05 \cdot 10^{-10}$
BiPO_4	$1,3 \cdot 10^{-23}$	CoC_2O_4	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Bi_2S_3	$1 \cdot 10^{-97}$	$\text{Co}_2\text{Fe(CN)}_6$	$4,8 \cdot 10^{-38}$
$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	$6,8 \cdot 10^{-19}$	$\text{Co(IO}_3)_2$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
$\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ (тартрат)	$7,7 \cdot 10^{-7}$	Co(OH)_2	$2,0 \cdot 10^{-16}$
CaCO_3	$3,8 \cdot 10^{-9}$	Co(OH)_3	$4 \cdot 10^{-45}$
CaC_2O_4	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$\text{CoS } \alpha$	$4,0 \cdot 10^{-21}$
CaCrO_4	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$\text{CoS } \beta$	$2,0 \cdot 10^{-25}$
CaF_2	$4,0 \cdot 10^{-11}$	CoSeO_3	$1,6 \cdot 10^{-7}$
$\text{Ca(NH}_4)_2\text{Fe(CN)}_6$	$4 \cdot 10^{-8}$	CrAsO_4	$7,8 \cdot 10^{-21}$
$\text{Ca(IO}_3)_2$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	Cr(OH)_2	$1,0 \cdot 10^{-17}$
Ca(OH)_2	$6,5 \cdot 10^{-6}$	Cr(OH)_3	$6,3 \cdot 10^{-31}$
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$2,0 \cdot 10^{-29}$	CrPO_4	$2,4 \cdot 10^{-23}$
CaPO_3F (Ca^{2+} , PO_3F^{2-})	$4 \cdot 10^{-3}$	CsClO_4	$4 \cdot 10^{-3}$
CaSO_3	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	$7,6 \cdot 10^{-36}$
CaSO_4	$2,5 \cdot 10^{-5}$	CuBr	$5,25 \cdot 10^{-9}$
CaSeO_3	$4,7 \cdot 10^{-6}$	CuCN	$3,2 \cdot 10^{-20}$
CaSiF_6	$8,1 \cdot 10^{-4}$	CuCO_3	$2,5 \cdot 10^{-10}$
CaWO_4	$9,0 \cdot 10^{-9}$	CuC_2O_4	$3 \cdot 10^{-9}$
$\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2$	$2,2 \cdot 10^{-33}$	CuCl	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Cd(CN)_2	$1,0 \cdot 10^{-8}$	CuCrO_4	$3,6 \cdot 10^{-6}$
CdCO_3	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$\text{Cu}_2\text{Fe(CN)}_6$	$1,3 \cdot 10^{-16}$
CdC_2O_4	$1,5 \cdot 10^{-8}$	CuI	$1,1 \cdot 10^{-12}$
$\text{Cd}_2\text{Fe(CN)}_6$	$4,2 \cdot 10^{-18}$	$\text{Cu(IO}_3)_2$	$7,4 \cdot 10^{-8}$
Cd(OH)_2	$5,9 \cdot 10^{-15}$	CuN_3	$5,0 \cdot 10^{-9}$
CdS	$1,6 \cdot 10^{-28}$	Cu_2O (2Cu^+ , OH^-)	$1 \cdot 10^{-14}$
CdSeO_3	$5,0 \cdot 10^{-9}$	Cu(OH)_2	$8,3 \cdot 10^{-20}$
$\text{Ce(IO}_3)_4$	$5 \cdot 10^{-17}$	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	$1,7 \cdot 10^{-34}$
$\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$8,3 \cdot 10^{-16}$	CuSe	$1 \cdot 10^{-49}$
CuS	$6,3 \cdot 10^{-36}$	CuSeO_3	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Cu_2S	$2,5 \cdot 10^{-48}$	FeAsO_4	$5,8 \cdot 10^{-21}$
CuSCN	$4,8 \cdot 10^{-15}$	FeCO_3	$3,5 \cdot 10^{-11}$

Продовження таблиці 6

1	2	3	4
FeC ₂ O ₄	$2 \cdot 10^{-7}$	Mn(OH) ₂	$1,9 \cdot 10^{-13}$
Fe ₄ [Fe(CN) ₆] ₃	$3,0 \cdot 10^{-41}$	Mn(OH) ₃	$1 \cdot 10^{-36}$
Fe(OH) ₂	$7,1 \cdot 10^{-16}$	MnS	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Fe(OH) ₃	$6,3 \cdot 10^{-38}$	MnSeO ₃	$5,4 \cdot 10^{-8}$
FePO ₄	$1,3 \cdot 10^{-22}$	(NH ₄) ₃ AlF ₆	$1,6 \cdot 10^{-3}$
FeS	$5 \cdot 10^{-18}$	(NH ₄) ₃ Co(NO ₂) ₆	$7,6 \cdot 10^{-6}$
HgS	$1,6 \cdot 10^{-52}$	(NH ₄) ₂ IrCl ₆	$3 \cdot 10^{-5}$
In(OH) ₃	$1,2 \cdot 10^{-37}$	(NH ₄) ₂ PtCl ₆	$9 \cdot 10^{-6}$
In ₂ S ₃	$5,75 \cdot 10^{-74}$	Na ₃ AlF ₆	$4,1 \cdot 10^{-10}$
K ₃ AlF ₆	$1,6 \cdot 10^{-9}$	NaSb(OH) ₆	$4 \cdot 10^{-8}$
K(C ₆ H ₅) ₄ B	$2,25 \cdot 10^{-8}$	Na ₂ SiF ₆	$2,8 \cdot 10^{-4}$
K ₃ Co(NO ₂) ₆	$4,3 \cdot 10^{-10}$	Ni ₃ (AsO ₄) ₂	$3,1 \cdot 10^{-26}$
K ₂ PdCl ₆	$6,0 \cdot 10^{-6}$	Ni(CN) ₂	$3 \cdot 10^{-23}$
K ₂ PtCl ₆	$1,1 \cdot 10^{-5}$	NiCO ₃	$1,3 \cdot 10^{-7}$
La ₂ S ₃	$2,0 \cdot 10^{-13}$	NiC ₂ O ₄	$4 \cdot 10^{-10}$
Li ₃ PO ₄	$3,2 \cdot 10^{-9}$	Ni(ClO ₃) ₂	$1 \cdot 10^{-4}$
Mg ₃ (AsO ₄) ₂	$2,1 \cdot 10^{-20}$	Ni(IO ₃) ₂	$1,4 \cdot 10^{-8}$
MgCO ₃	$2,1 \cdot 10^{-5}$	Ni(OH) ₂	$2,0 \cdot 10^{-15}$
MgC ₂ O ₄	$8,6 \cdot 10^{-5}$	Ni ₂ P ₂ O ₇	$1,7 \cdot 10^{-13}$
MgF ₂	$6,5 \cdot 10^{-9}$	NiS	$3,2 \cdot 10^{-19}$
Mg(IO ₃) ₂	$3 \cdot 10^{-3}$	NiSeO ₃	$1,0 \cdot 10^{-5}$
MgK ₂ Fe(CN) ₆	$5 \cdot 10^{-9}$	Ni ₂ Fe(CN) ₆	$1,3 \cdot 10^{-15}$
Mg(NH ₄) ₂ Fe(CN) ₆	$4 \cdot 10^{-8}$	PbBr ₂	$9,1 \cdot 10^{-6}$
MgNH ₄ PO ₄	$2,5 \cdot 10^{-13}$	Pb(BrO ₃) ₂	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Mg(OH) ₂	$7,1 \cdot 10^{-12}$	Pb ₃ (AsO ₄) ₂	$4,1 \cdot 10^{-36}$
Mg ₃ (PO ₄) ₂	$1 \cdot 10^{-13}$	PbCO ₃	$7,5 \cdot 10^{-14}$
MgSO ₃	$3 \cdot 10^{-3}$	PbC ₂ O ₄	$4,8 \cdot 10^{-10}$
MgSeO ₃	$4,4 \cdot 10^{-6}$	PbCl ₂	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Mn ₃ (AsO ₄) ₂	$1,9 \cdot 10^{-29}$	PbCrO ₄	$1,8 \cdot 10^{-14}$
MnCO ₃	$1,8 \cdot 10^{-11}$	PbF ₂	$2,7 \cdot 10^{-8}$
MnC ₂ O ₄	$5 \cdot 10^{-6}$	Pb ₂ Fe(CN) ₆	$9,55 \cdot 10^{-19}$
Mn ₂ Fe(CN) ₆	$7,9 \cdot 10^{-13}$	PbI ₂	$1,1 \cdot 10^{-9}$
MnNH ₄ PO ₄	$1 \cdot 10^{-12}$	Pb(IO ₃) ₂	$2,6 \cdot 10^{-13}$

Продовження таблиці 6

1	2	3	4
PbMoO ₄	$4,0 \cdot 10^{-6}$	SrCrO ₄	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Pb(N ₃) ₂	$2,6 \cdot 10^{-9}$	SrF ₂	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Pb(OH) ₂	$7,9 \cdot 10^{-16}$	Sr(IO ₃) ₂	$3,3 \cdot 10^{-7}$
Pb ₃ (PO ₄) ₂	$7,9 \cdot 10^{-43}$	SrMoO ₄	$2 \cdot 10^{-7}$
PbS	$2,5 \cdot 10^{-27}$	Sr(OH) ₂	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Pb(SCN) ₂	$2,0 \cdot 10^{-5}$	Sr ₃ (PO ₄) ₂	$1 \cdot 10^{-31}$
PbSO ₄	$1,6 \cdot 10^{-8}$	SrSO ₃	$4 \cdot 10^{-8}$
PbS ₂ O ₃	$4,0 \cdot 10^{-7}$	SrSO ₄	$3,2 \cdot 10^{-7}$
PbSe	$1 \cdot 10^{-38}$	SrSeO ₃	$4,4 \cdot 10^{-6}$
PbSeO ₃	$3 \cdot 10^{-12}$	Y(OH) ₃	$6,3 \cdot 10^{-25}$
PbSeO ₄	$1,45 \cdot 10^{-7}$	Zn ₃ (AsO ₄) ₂	$1,3 \cdot 10^{-28}$
PbWO ₄	$4,5 \cdot 10^{-7}$	Zn(CN) ₂	$2,6 \cdot 10^{-13}$
Pb(OH) ₄	$3,0 \cdot 10^{-66}$	ZnCO ₃	$1,45 \cdot 10^{-11}$
Sc(OH) ₃	$5,0 \cdot 10^{-37}$	ZnC ₂ O ₄	$2,75 \cdot 10^{-8}$
SnI ₂	$8,3 \cdot 10^{-6}$	Zn ₂ Fe(CN) ₆	$2,1 \cdot 10^{-16}$
Sn(OH) ₂	$6,3 \cdot 10^{-27}$	Zn(IO ₃) ₂	$2,0 \cdot 10^{-8}$
Sn(OH) ₄	$1 \cdot 10^{-57}$	Zn(OH) ₂	$1,4 \cdot 10^{-17}$
SnS	$2,5 \cdot 10^{-27}$	Zn ₃ (PO ₄) ₂	$9,1 \cdot 10^{-33}$
Sr ₃ (AsO ₄) ₂	$1,3 \cdot 10^{-18}$	ZnS	$1,6 \cdot 10^{-24}$
SrCO ₃	$1,1 \cdot 10^{-10}$	ZnSe	$1 \cdot 10^{-31}$
SrC ₂ O ₄	$1,6 \cdot 10^{-7}$	ZnSeO ₃	$1,9 \cdot 10^{-8}$

Таблиця 7

Стандартні електродні потенціали (E°) при 25°C

Елемент	Полуреакція	$E^\circ, \text{В}$
1	2	3
Ag	$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag} \downarrow$	+0,7994
	$\text{AgBr} \downarrow + e = \text{Ag} \downarrow + \text{Br}^-$	+0,071
	$\text{AgCl} \downarrow + e = \text{Ag} \downarrow + \text{Cl}^-$	+0,222
	$\text{AgI} \downarrow + e = \text{Ag} \downarrow + \text{I}^-$	-0,152

Продовження таблиці 7

1	2	3
As	$\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,56
	$\text{AsO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{AsO}_2^- + 4\text{OH}^-$	-0,71
Br	$\text{Br}_2 + 2e = 2\text{Br}^-$	+1,087
	$2\text{BrO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10e = \text{Br}_2\downarrow + 6\text{H}_2\text{O}$	+1,52
	$2\text{BrO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} + 10e = \text{Br}_2\downarrow + 12\text{OH}^-$	+0,50
C	$\text{CO}_2\uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{HCOOH}$	-0,20
	$2\text{CO}_2\uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-0,49
Ca	$\text{Ca}^{2+} + 2e = \text{Ca}\downarrow$	-2,79
Cd	$\text{Cd}^{2+} + 2e = \text{Cd}\downarrow$	-0,403
Ce	$\text{Ce}^{4+} + e = \text{Ce}^{3+}$	+1,77
Cl	$\text{Cl}_2\uparrow + 2e = 2\text{Cl}^-$	+1,359
	$2\text{HOCl} + 2\text{H}^+ + 2e = \text{Cl}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+1,63
	$2\text{ClO}^- + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{Cl}_2\uparrow + 4\text{OH}^-$	+0,40
	$\text{HClO} + \text{H}^+ + 2e = \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	+1,50
	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	+0,88
	$\text{HClO}_2 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{HClO} + \text{H}_2\text{O}$	+1,64
	$2\text{HClO}_2 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Cl}_2\uparrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,63
	$\text{HClO}_2 + 3\text{H}^+ + 4e = \text{Cl}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,56
	$\text{ClO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{ClO}^- + 2\text{OH}^-$	+0,66
	$\text{ClO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{Cl}^- + 4\text{OH}^-$	+0,77
	$\text{ClO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2e = \text{HClO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+1,21
	$\text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{ClO}_2^- + 2\text{OH}^-$	+0,33
	$\text{ClO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{ClO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+1,15
	$\text{ClO}_3^- + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Cl}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+1,45
	$\text{ClO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{Cl}^- + 6\text{OH}^-$	+0,63
	$\text{ClO}_4^- + 2\text{H}^+ + 2e = \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	+1,19
	$\text{ClO}_4^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{ClO}_3^- + 2\text{OH}^-$	+0,36
	$2\text{ClO}_4^- + 16\text{H}^+ + 14e = \text{Cl}_2\uparrow + 8\text{H}_2\text{O}$	+1,39
	$\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8e = \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,38
	$\text{ClO}_4^- + 4\text{H}_2\text{O} + 8e = \text{Cl}^- + 8\text{OH}^-$	+0,56

1	2	3
Co	$\text{Co}^{3+} + e = \text{Co}^{2+}$	+1,95
	$\text{Co}^{2+} + 2e = \text{Co} \downarrow$	-0,29
	$\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{3+} + e = \text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$	+0,1
Cr	$\text{Cr}^{3+} + e = \text{Cr}^{2+}$	-0,41
	$\text{Cr}^{3+} + 3e = \text{Cr} \downarrow$	-0,74
	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6e = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	+1,33
	$\text{CrO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{Cr}(\text{OH})_3 \downarrow + 5\text{OH}^-$	-0,13
Cu	$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu} \downarrow$	+0,345
	$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu} \downarrow$	+0,531
Cu	$\text{Cu}^{2+} + e = \text{Cu}^+$	+0,159
F	$\text{F}_2 \uparrow + 2e = 2\text{F}^-$	+2,77
Fe	$\text{Fe}^{3+} + e = \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{Fe}^{3+} + 3e = \text{Fe} \downarrow$	-0,058
	$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe} \downarrow$	-0,473
	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e = \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	+0,364
Ga	$\text{Ga}^{3+} + 3e = \text{Ga} \downarrow$	-0,56
H	$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2 \uparrow$	0,0000
	$2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$	-0,828
	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,77
	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = 3\text{OH}^-$	+0,88
Hg	$2\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg}_2^{2+}$	+0,907
	$\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg} \downarrow$	+0,850
	$\text{Hg}_2^{2+} + 2e = \text{Hg} \downarrow$	+0,792
I	$\text{I}_2 \downarrow + 2e = 2\text{I}^-$	+0,536
	$\text{I}_2 + 2e = 2\text{I}^-$	+0,621
	$\text{I}_3^- + 2e = 3\text{I}^-$	+0,545
	$2\text{IBr} + 2e = \text{I}_2 \downarrow + 2\text{Br}^-$	+1,02
	$\text{ICN} \uparrow + 2e = \text{I}^- + \text{CN}^-$	+0,30
	$2\text{ICN} \uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{I}_2 \downarrow + 2\text{HCN}$	+0,63

1	2	3
I	$2\text{HIO} + 2\text{H}^+ + 2e = \text{I}_2\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,45
	$2\text{IO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{I}_2\downarrow + 4\text{OH}^-$	+0,45
	$\text{HIO} + \text{H}^+ + 2e = \text{I}^- + \text{H}_2\text{O}$	+0,99
	$\text{IO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{I}^- + 2\text{OH}^-$	+0,49
	$\text{IO}_3^- + 5\text{H}^+ + 4e = \text{HIO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,14
	$\text{IO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{IO}^- + 4\text{OH}^-$	+0,14
	$2\text{IO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10e = \text{I}_2\downarrow + 6\text{H}_2\text{O}$	+1,19
	$2\text{IO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O} + 10e = \text{I}_2\downarrow + 12\text{OH}^-$	+0,21
	$\text{IO}_3^- + 6\text{H}^+ + 6e = \text{I}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+1,08
	$\text{IO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{I}^- + 6\text{OH}^-$	+0,26
	$\text{H}_5\text{IO}_6 + \text{H}^+ + 2e = \text{IO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O}$	$\approx +1,6$
	$\text{H}_3\text{IO}_6^{2-} + 2e = \text{IO}_3^- + 3\text{OH}^-$	$\approx +0,7$
	$\text{H}_5\text{IO}_6 + 7\text{H}^+ + 8e = \text{I}^- + 6\text{H}_2\text{O}$	$\approx +1,24$
	$\text{H}_3\text{IO}_6^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 8e = \text{I}^- + 9\text{OH}^-$	$\approx +0,37$
In	$\text{In}^{3+} + 3e = \text{In}\downarrow$	-0,34
Ir	$\text{Ir}^{3+} + 3e = \text{Ir}\downarrow$	$\approx +1,15$
K	$\text{K}^+ + e = \text{K}\downarrow$	-2,923
La	$\text{La}^{3+} + 3e = \text{La}\downarrow$	-2,52
Li	$\text{Li}^+ + e = \text{Li}\downarrow$	-3,04
Mg	$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}\downarrow$	-2,37
Mn	$\text{Mn}^{3+} + e = \text{Mn}^{2+}$	+1,51
	$\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}\downarrow$	-1,17
	$\text{Mn}(\text{OH})_3\downarrow + e = \text{Mn}(\text{OH})_2\downarrow + \text{OH}^-$	+0,1
	$\text{MnO}_2\downarrow + 4\text{H}^+ + 2e = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23
	$\text{MnO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{MnO}_2\downarrow + 4\text{OH}^-$	+0,58
	$\text{MnO}_4^- + e = \text{MnO}_4^{2-}$	+0,558
	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3e = \text{MnO}_2\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,69
	$\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{MnO}_2\downarrow + 4\text{OH}^-$	+0,60
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5e = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,51

1	2	3
Mo	$\text{Mo}^{3+} + 3e = \text{Mo} \downarrow$	-0,2
	$\text{MoO}_2^+ + 4\text{H}^+ + 2e = \text{Mo}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	0,0
	$\text{MoO}_2^{2+} + e = \text{MoO}_2^+$	+0,48
	$\text{H}_2\text{MoO}_4 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Mo} \downarrow + 4\text{H}_2\text{O}$	0,0
	$\text{MoO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{Mo} \downarrow + 8\text{OH}^-$	-1,05
N	$\text{HN}_3 + 11\text{H}^+ + 8e = 3\text{NH}_4^+$	+0,69
	$3\text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = 2\text{HN}_3$	-3,1
	$3\text{N}_2 \uparrow + 2e = 2\text{N}_3^-$	-3,4
	$\text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ + 2e = 2(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{H}^+)$	-1,87
	$\text{N}_2 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O} + 2e = 2\text{NH}_2\text{OH} + 2\text{OH}^-$	-3,04
	$\text{N}_2 \uparrow + 5\text{H}^+ + 4e = \text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}^+$	-0,23
	$\text{N}_2 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{N}_2\text{H}_4 + 4\text{OH}^-$	-1,16
	$\text{N}_2 \uparrow + 8\text{H}^+ + 6e = 2\text{NH}_4^+$	+0,26
	$\text{N}_2 \uparrow + 8\text{H}_2\text{O} + 6e = 2\text{NH}_4\text{OH} + 6\text{OH}^-$	-0,74
	$\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}^+ + 3\text{H}^+ + 2e = 2\text{NH}_4^+$	+1,27
	$\text{N}_2\text{H}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + 2e = 2\text{NH}_4\text{OH} + 2\text{OH}^-$	+0,1
	$\text{NH}_2\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{NH}_4\text{OH} + 2\text{OH}^-$	+0,42
	$\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$	+2,65
	$\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 4e = 2(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{H}^+)$	+0,50
	$2\text{HNO}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = \text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,83
	$\text{HNO}_2 + \text{H}^+ + e = \text{NO} \uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+0,98
	$\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + e = \text{NO} \uparrow + 2\text{OH}^-$	-0,46
	$2\text{HNO}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = \text{N}_2\text{O} \uparrow + 3\text{H}_2\text{O}$	+1,29
	$2\text{HNO}_2 + 6\text{H}^+ + 4e = \text{N}_2 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,44
N	$2\text{NO}_2^- + 4\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{N}_2 \uparrow + 8\text{OH}^-$	+0,41
	$\text{HNO}_2 + 7\text{H}^+ + 6e = \text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,86
	$\text{NO}_2^- + 6\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{NH}_4\text{OH} + 7\text{OH}^-$	-0,15
	$\text{N}_2\text{O} \uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{N}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+1,77
	$\text{N}_2\text{O} \uparrow + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{N}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$	+0,94

1	2	3
N	$2\text{NO}\uparrow + 4\text{H}^+ + 4e = \text{N}_2\uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,68
	$2\text{NO}\uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{N}_2\uparrow + 4\text{OH}^-$	+0,85
	$\text{N}_2\text{O}_4\uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = 2\text{HNO}_2$	+1,07
	$\text{N}_2\text{O}_4\uparrow + 2e = 2\text{NO}_2^-$	+0,88
	$\text{N}_2\text{O}_4\uparrow + 8\text{H}^+ + 8e = \text{N}_2\uparrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,35
	$\text{N}_2\text{O}_4\uparrow + 4\text{H}_2\text{O} + 8e = \text{N}_2\uparrow + 8\text{OH}^-$	+0,53
	$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2e = \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,94
	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{NO}_2^- + 2\text{OH}^-$	+0,01
	$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{NO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+0,80
	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + e = \text{NO}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$	-0,86
	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e = \text{NO}\uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,96
	$\text{NO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{NO}\uparrow + 4\text{OH}^-$	-0,14
	$2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10e = \text{N}_2\uparrow + 6\text{H}_2\text{O}$	+1,24
	$\text{NO}_3^- + 8\text{H}^+ + 6e = \text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,73
	$2\text{NO}_3^- + 17\text{H}^+ + 14e = \text{N}_2\text{H}_4\cdot\text{H}^+ + 6\text{H}_2\text{O}$	+0,84
	$\text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8e = \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	+0,87
	$\text{NO}_3^- + 7\text{H}_2\text{O} + 8e = \text{NH}_4\text{OH} + 9\text{OH}^-$	-0,12
Na	$\text{Na}^+ + e = \text{Na}\downarrow$	-2,713
Nb	$\text{Nb}^{3+} + 3e = \text{Nb}\downarrow$	-1,1
Ni	$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}\downarrow$	-0,228
O	$\text{O}_2\uparrow + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,229
	$\text{O}_2\uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = 4\text{OH}^-$	+0,401
	$\text{O}_2\uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2\text{O}_2$	+0,682
	$\text{O}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	-0,076
	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,77
	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2e = 3\text{OH}^-$	+0,88
	$\text{O}_3\uparrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{O}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$	+2,07
	$\text{O}_3\uparrow + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{O}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$	+0,02

1	2	3
Os	$\text{Os}^{2+} + 2e = \text{Os}\downarrow$	+0,85
	$\text{OsO}_4\downarrow + 8\text{H}^+ + 8e = \text{Os}\downarrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,85
P	$\text{P}\downarrow + 3\text{H}^+ + 3e = \text{PH}_3\uparrow$	+0,06
	$\text{P}\downarrow + 3\text{H}_2\text{O} + 3e = \text{PH}_3\uparrow + 3\text{OH}^-$	-0,89
	$\text{H}_3\text{PO}_2 + \text{H}^+ + e = \text{P}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,51
	$\text{H}_2\text{PO}_2^- + e = \text{P}\downarrow + 2\text{OH}^-$	-2,05
	$\text{H}_3\text{PO}_3 + 3\text{H}^+ + 3e = \text{P}\downarrow + 3\text{H}_2\text{O}$	-0,50
	$\text{H}_3\text{PO}_3 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_3\text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-0,50
	$\text{HPO}_3^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{H}_2\text{PO}_2^- + 3\text{OH}^-$	-1,57
	$\text{H}_3\text{PO}_4 + 5\text{H}^+ + 5e = \text{P}\downarrow + 4\text{H}_2\text{O}$	-0,41
	$\text{H}_3\text{PO}_4 + 4\text{H}^+ + 4e = \text{H}_3\text{PO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,39
	$2\text{H}_3\text{PO}_4 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_4\text{P}_2\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,94
	$\text{H}_3\text{PO}_4 + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-0,276
	$\text{PO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{HPO}_3^{2-} + 3\text{OH}^-$	-1,12
Pb	$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}\downarrow$	-0,126
	$\text{Pb}^{4+} + 2e = \text{Pb}^{2+}$	+1,66
Pb	$\text{Pb}^{4+} + 4e = \text{Pb}\downarrow$	+0,77
	$\text{PbO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{PbO}\downarrow + 2\text{OH}^-$	+0,28
	$\text{PbO}_2\downarrow + 4\text{H}^+ + 2e = \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,455
Pd	$\text{Pd}^{2+} + 2e = \text{Pd}\downarrow$	+0,915
Pt	$\text{Pt}^{2+} + 2e = \text{Pt}\downarrow$	+1,2
S	$\text{S}\downarrow + 2e = \text{S}^{2-}$	-0,476
	$\text{S}\downarrow + 2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2\text{S}\uparrow$	+0,171
	$(\text{SCN})_2\uparrow + 2e = 2\text{SCN}^-$	+0,77
	$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2e = 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	+0,09
	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 4e = 2\text{S}\downarrow + 3\text{H}_2\text{O}$	+0,5
	$2\text{H}_2\text{SO}_3 + 2\text{H}^+ + 4e = \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$	+0,40
	$2\text{SO}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 6\text{OH}^-$	-0,58
	$2\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}^+ + 2e = \text{HS}_2\text{O}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,08

1	2	3
S	$2\text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{S}_2\text{O}_4^{2-} + 4\text{OH}^-$	-1,12
	$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	+0,17
	$\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{SO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$	-0,93
	$2\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8e = \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 5\text{H}_2\text{O}$	+0,29
	$2\text{SO}_4^{2-} + 5\text{H}_2\text{O} + 8e = \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 10\text{OH}^-$	-0,76
	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6e = \text{S}\downarrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,36
	$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 6e = \text{S}\downarrow + 8\text{OH}^-$	-0,75
	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e = 2\text{SO}_4^{2-}$	+2,01
Sb	$\text{SbO}^+ + 2\text{H}^+ + 3e = \text{Sb}\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	+0,212
Sc	$\text{Sc}^{3+} + 3e = \text{Sc}\downarrow$	-2,08
Se	$\text{SeO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{SeO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$	+0,05
Si	$\text{SiO}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 4e = \text{Si}\downarrow + 6\text{OH}^-$	-1,7
Sn	$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}\downarrow$	-0,140
	$\text{Sn}^{4+} + 2e = \text{Sn}^{2+}$	+0,15
	$\text{Sn}^{4+} + 4e = \text{Sn}\downarrow$	+0,01
Sr	$\text{Sr}^{2+} + 2e = \text{Sr}\downarrow$	-2,89
Te	$\text{TeO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{TeO}_3^{2-} + 2\text{OH}^-$	+0,4
Th	$\text{Th}^{4+} + 4e = \text{Th}\downarrow$	-1,90
Ti	$\text{Ti}^{2+} + 2e = \text{Ti}\downarrow$	-1,63
	$\text{TiO}_2\downarrow + 4\text{H}^+ + 4e = \text{Ti}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,86
	$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + 4e = \text{Ti}\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	-0,88
	$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + e = \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	+0,1
	$\text{Ti}^{3+} + e = \text{Ti}^{2+}$	-0,37
Tl	$\text{Tl}^+ + e = \text{Tl}\downarrow$	-0,357
	$\text{Tl}^{3+} + 2e = \text{Tl}^+$	+1,25
	$\text{U}^{4+} + e = \text{U}^{3+}$	-0,61
	$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + 2e = \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,33
V	$\text{V}^{2+} + 2e = \text{V}\downarrow$	-1,18
	$\text{V}^{3+} + e = \text{V}^{2+}$	-0,255

Продовження таблиці 10

1	2	3
V	$\text{VO}^{2+} + 2\text{H}^+ + e = \text{V}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	+0,337
	$\text{VO}^{2+} + e = \text{VO}^+$	−0,044
	$\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + e = \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	+1,000
	$\text{VO}_2^+ + 4\text{H}^+ + 2e = \text{V}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,668
	$\text{VO}_2^+ + 4\text{H}^+ + 3e = \text{V}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,360
	$\text{VO}_2^+ + 4\text{H}^+ + 5e = \text{V}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	−0,25
	$\text{VO}_4^{3-} + 6\text{H}^+ + 2e = \text{VO}^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	+1,26
	$\text{H}_2\text{VO}_4^- + 4\text{H}^+ + e = \text{VO}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	+1,31
W	$\text{WO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6e = \text{W}\downarrow + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,05
Y	$\text{Y}^{3+} + 3e = \text{Y}\downarrow$	−2,37
Zn	$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}\downarrow$	−0,764
	$\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2e = \text{Zn}\downarrow + 2\text{OH}^-$	−1,245
	$\text{ZnO}_2^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Zn} + 4\text{OH}^-$	−1,216
Zr	$\text{ZrO}_2\downarrow + 4\text{H}^+ + 4e = \text{Zr}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$	−1,43

Зразок титульного листа контрольної роботи

Міністерство освіти і науки України
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Аграрний факультет
Кафедра ветеринарії та тваринництва

Аналітична хімія

Контрольна робота
Варіант _____

Роботу перевіриє

група _____

(посада та ІПБ викладача)

Студент: _____

(оцінка роботи)

(дата, підпис викладача)

(особистий підпис)

Особливі умови:
перевірену роботу направити за адресою:

Робота здана на перевірку:

(дата здачі)

Роботу на кафедрі прийняв:

(ІПБ)

(підпис)

(підпис студента)

Київ
20 /20 н.р.

3. Література

Основна

1. А.С.Сегеда. Аналітична хімія. Якісний аналіз.- К.; ЦУЛ.-2002.-524с.
2. Серета А.С., Галаган Р.Л. Збірник задач і вправ з аналітичної хімії. Якісний аналіз. –Київ: ЦУЛ.Фітосоціоцентр, 2002.-429с.
3. Аналітична хімія : підручник для студентів напряму «Фармація» і «Біотехнологія» вищих навчальних закладів / Н.К. Федущак, Ю.І. Бідниченко, С.Ю. Крамаренко, В.О. Калібабчук та ін. Вінниця: Нова книга, 2012. 640 с. ISBN 978-966-382-372-0
4. Аналітична хімія : Якісний та кількісний аналіз : навчальний конспект лекцій / кол. авторів; за ред. проф. В.В. Болотова. Вінниця: Нова книга, 2011. 424с. ISBN 978-966-382-354-6
5. Аналітична хімія. Для навчання за спеціальністю «Екологія» : навч. посіб. / кол. авторів; за ред. В.А. Копілевича. 2-е вид., випр. і доп. Київ: ДДП «Експо-Друк», 2020. 260 с.
URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u342/posanhim_ekol_2020.pdf
6. Аналітична хімія. Задачі та вправи : навч. посіб. / М.М. Більченко, Р.М. Пшеничний. Суми: Університетська книга, 2015. 205 с. ISBN 978-966-680-766-6
URL: https://library.sspu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/04/Bilchenko_Analitichna_himia_2015.pdf
7. Аналітична хімія. Якісний аналіз : навч.-метод. посіб. / Т.Д. Рева, О.М. Чхало, Г.М. Зайцева та ін. Київ: ВСВ «Медицина», 2017. 280 с. ISBN: 978-617-505-578-6
8. Кількісний аналіз. Титриметричні методи аналізу / Петренко В.В., Стрілець Л.М., Васюк С.О. Дерюгіна Л.І., Дочинець Д.І. Запоріжжя, 2006. 215 с.
9. Практикум з аналітичної хімії : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / кол. авторів; за ред. В.В. Болотова. Харків: Золоті сторінки, 2003. 240 с. ISBN 966-615-196-0. ISBN 966-8494-03-2.
URL: https://resource.odmu.edu.ua/chair/download/111171/MXyDWawPae_MJFt-q8w5Gg/практикум_аналітична_хімія.pdf

Довідкові ресурси

1. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th ed. : Editor-in-Chief W. M. Haynes. CRC Press/Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL. 2015. 2666 p. International Standard Book Number-13: 978-1-4822-0868-9 (eBook - PDF).
URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf
2. Techemy. Chemistry for you.
URL: <https://techemy.com/довідник/довідкові-таблиці/щільність-водних-розчинів/>

Методичне забезпечення

1. Аналітична хімія та інструментальні методи аналізу : навч. посіб. / О. Захарова. – Київ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2023. – 175 с. ISBN 978-617-11-0239-2 URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/809>
2. Аналітична хімія та інструментальні методи аналізу : навч. посібник /Тарасов В.Ю., Заїка Р.Г., Захарова О.І.//Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля. - 2015. - 172с.
3. Захарова О.І. Аналітична хімія та основи фармацевтичного аналізу. Якісний аналіз : навч. посібник / Захарова О.І., Тарасов В.Ю., Пономаренко Н.І., Гнітько І.В., Лукіна І.А. // Лисичанськ : ФОКСПРИНТ, 2021. – 159 с.
4. Analytical chemistry. Workbook for laboratory work 1 (qualitative analysis). Уклад.: О. І. Захарова - Северодонецьк, вид-во СНУ ім. В. Даля. - 2019. – 40 с. - Реєстраційний №8091
5. Електронний університет: курс АХ та ІМА
<http://moodle2.snu.edu.ua/course/view.php?id=4560>

навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання контрольної роботи з дисципліни

«АНАЛІТИЧНА ХІМІЯ»

(для студентів заочної форми навчання
спеціальності G13 Харчові технології)

Укладач:

О.І. Захарова

Оригінал-макет

О.І. Захарова

Підписано до друку _____

Формат 60x84/16. Папір типограф. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. _____. Облік. видавн. арк. _____

Тираж ____ екз. Вид. № _____. Замовл. № _____. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Адреса видавництва: м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17.

Телефон: +38 (050) 218 04 78, факс (06452) 4 03 42

E-mail: vidavnictvosnu.ua@gmail.com