



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки,
біомедичної інженерії та електротехніки**

**ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ РОЗЧИНІВ ТА БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
І ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

**Методичні вказівки
до виконання практичної роботи**

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та
(заочної) форми навчання, спеціальності
163 «Біомедична інженерія»**

**Харків
2024**

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки

ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ РОЗЧИНІВ ТА БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
І ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Методичні вказівки
до виконання практичної роботи

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та
(заочної) форми навчання, спеціальності
163 «Біомедична інженерія»

Затверджено
рішенням Науково-методичної
ради факультету ЕРКТ
Протокол № 1 від 31 жовтня 2023 р.

Харків
2024

УДК 681.5: 631.1(072)

Схвалено
на засіданні кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії
та електротехніки
Протокол № 1 від 31 жовтня 2023 р.

Рецензент:

О.М. Мороз, д-р тех. наук, проф. кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет.

Електрична провідність розчинів та біологічних об'єктів і її використання в медико-біологічних дослідженнях : метод. вказівки до виконання практ. роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія» / Державний біотехнологічний університет, уклад.: В. О. Шигимага, Н. Г. Косуліна, Чорна М. О., Сухін В. В., Ляшенко Г. А., Коршунов К. С. – Харків: [б. в.], 2024.– 27 с.

Методичні вказівки включають практичну роботу та список літератури. Матеріал містить електрофізичні основи виникнення провідності розчинів при накладенні зовнішнього електричного поля, поняття питомої та молярної електричної провідності, а також технічні засоби вимірювання. Розглянуто електропровідність біооб'єктів та використання цього параметру в медико-біологічних дослідженнях.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання спеціальності 163 Біомедична інженерія.

Відповідальний за випуск: В.О. Шигимага, д. т. н., проф.

© Шигимага В.О., 2024

© ДБТУ, 2024

Практична робота № 4

Електрична провідність розчинів та біологічних об'єктів і її використання в медико-біологічних дослідженнях

1. Мета роботи: Розглянути процес виникнення електропровідності розчинів, основні положення теорії електролітів, електропровідність біологічних об'єктів та її визначення; визначення електропровідності в медико-біологічних дослідженнях.

2. Загальні положення

Взаємозв'язок електричних і хімічних явищ вивчає електрохімія. Виникнення електрохімії як науки пов'язано з іменами Л. Гальвані, А. Вольта, В. Петрова, пізніше – з іменами Х. Деві (відкриття електролізу), М. Фарадея (закони електролізу), Б. Якобі (відкриття гальванопластики), С. Арреніуса (теорія електролітичної дисоціації). Роком зародження електрохімії вважається 1791, коли Л. Гальвані, препаруючи жаб, виявив "живу" електрику.

В даний час одним з основних розділів фізичної хімії є електрохімія, а спеціальним предметом її – кондуктометрія. Кондуктометрія – фізико-хімічний метод аналізу, заснований на вимірюванні електропровідності (провідності) рідких середовищ. Методи і апаратура електрохімії з часів виділення цієї науки, як самостійної частини фізичної хімії, традиційно розвивалися в основному тільки завдяки вивченню об'єктів неорганічної природи – хімічних сполук різно-особистих класів в стані розчину або розплаву. В останні 20-25 років сфера застосування методів електрохімії, особливо кондуктометричного

аналізу, значно розширилася за рахунок перенесення уваги дослідників на органічні, зокрема, біологічні та медичні об'єкти, а саме, суспензії клітин, біологічні рідини і тканини.

Перша згадка про дослідження електричної провідності біологічних об'єктів прийнято відносити до робіт В. Томсона, датований 1880р. Основоположні результати в цій області були отримані на початку і середині ХХ століття. До них відносяться встановлення типових значень питомого опору і діелектричної проникності тканин, органів і рідких середовищ живого організму, а також виявлення і часткове об'яснення залежності провідності і діелектричної проникності біологічних рідин і клітинних суспензій від частоти зондуючого струму. З цими досягненнями пов'язані імена Г. Фріке, К. Коула, Б.Н. Тарусова, Г. Шванна та інших дослідників. Поняття електричного опору було введено в фізику Георгом Омом, який в результаті експериментальних досліджень відкрив закон, що отримав його ім'я. У середині ХХ століття на межі біології та електрохімії виникла біоелектрохімія, яка вивчає електрохімічні основи роботи живих систем. Основними об'єктами вивчення біоелектрохімії є біологічні мембрани.

За фізичною класифікацією електропровідних властивостей всі провідники електричного струму діляться на два роду: першого і другого. Провідники першого роду – це електронні провідники, тобто такі провідники, в яких переносниками заряду (електричного струму) є електрони. До провідників першого роду відносяться метали. Провідники другого роду – це іонні провідники, тобто такі провідники, в яких переносниками заряду є іони. До провідників другого роду відносяться електроліти, тобто такі речовини, які в розчинах або розплавах проводять електричний струм. Всі тканини організму проникнуті і омиваються біологічними рідинами, в яких розчинені сильні і слабкі електроліти. Тому такі біологічні рідини як кров, лімфа, спинномозкова рідина, слізна рідина, слина і т.д. відносяться до провідників другого роду.

Таким чином, внутрішнє середовище тварин і людини має іонний тип

провідності. Найкраще проводять електричний струм біологічні рідини і тканини, що містять відносно великі концентрації високорухливих іонів. Це кров, лімфа, м'язова тканина. Поганими провідниками електричного струму є нервова тканина, шкіра, сухожилля. Кісткова тканина є діелектриком. Електрична провідність шкіри і внутрішніх органів може змінюватися при різних патологічних станах. Наприклад, при запальних процесах електрична провідність тканин зменшується. Різким зменшенням електропровідності супроводжується процес перетворення нормальних клітин в пухлинні. Все це важливо для постановки діагнозу.

Отже, електропровідність біологічних рідин, клітин, тканин, органів та організму в цілому є сучасним і найважливішим діагностичним параметром стану тварин та людини і, навіть, рослин.

3. Основні положення теорії електролітів. Абсолютна швидкість руху іонів

У розчинах електролітів сольватовані (розчинені) іони знаходяться в безладному русі. При накладенні електричного поля виникає впорядкований рух іонів до протилежно заряджених електродів. Порівняння швидкостей руху різних видів іонів виробляють при градієнті потенціалу поля 1 В/м. Для цих умов швидкість руху іонів називають абсолютною, позначають буквою ω і висловлюють в $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Абсолютна швидкість руху іона - це відстань в метрах, яку проходить іон за 1с при градієнті потенціалу 1 В/м. Чисельні значення абсолютних швидкостей руху іонів в даному розчиннику залежать тільки від їх природи і температури.

Для оцінки здатності іонів до переміщення під дією зовнішнього поля використовують також кількісну характеристику – рухливість іонів (U).

Рухливість іона являє собою добуток числа Фарадея ($F = 96465 \text{ В}\cdot\text{с}\cdot\text{См}\cdot\text{моль}^{-1}$) на абсолютну швидкість руху іона і виражається в $\text{См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$:

$$U = F \cdot \omega, \quad (1)$$

Значення абсолютних швидкостей руху і рухливостей іонів при 25°C представлені в таблиці 1. З наведених в табл.1 даних можна углядіти деякі закономірності.

Таблиця 1

Катіон	ω $\text{м}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$	U $\text{См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$	Аніон	ω $\text{м}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$	U $\text{См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$
H^+	$36,3 \cdot 10^{-8}$	$349,9 \cdot 10^{-4}$	OH^-	$20,6 \cdot 10^{-8}$	$199,2 \cdot 10^{-4}$
Li^+	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$38,7 \cdot 10^{-4}$	F^-	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$55,4 \cdot 10^{-4}$
Na^+	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$50,3 \cdot 10^{-4}$	Cl^-	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$76,3 \cdot 10^{-4}$
K^+	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$73,5 \cdot 10^{-4}$	Br^-	$8,1 \cdot 10^{-8}$	$78,4 \cdot 10^{-4}$
Rb	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$77,5 \cdot 10^{-4}$	I^-	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$76,9 \cdot 10^{-4}$
Cs^+	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$77,5 \cdot 10^{-4}$	NO_3^-	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$71,5 \cdot 10^{-4}$
NH_4^{2+}	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$73,5 \cdot 10^{-4}$	CH_3COO^-	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$40,9 \cdot 10^{-4}$
Mg^{2+}	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$106,1 \cdot 10^{-4}$	CO_3^{2-}	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$138,6 \cdot 10^{-4}$
Al^{3+}	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$183,2 \cdot 10^{-4}$	SO_4^{2-}	$8,3 \cdot 10^{-8}$	$159,6 \cdot 10^{-4}$

По-перше, абсолютна швидкість руху катіонів зростає в межах однієї групи періодичної системи елементів з ростом порядкового номера, як це видно з даних для катіонів лужних металів. Порівняння розташованих в одному періоді і мають приблизно однаковий розмір іонів Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} показує незначне збільшення абсолютної швидкості руху зі збільшенням заряду іона.

Сіменс/метр (См/м). Питома електрична провідність залежить від багатьох факторів і, перш за все, від природи електроліту, його концентрації і температури. Ізотерми питомої електричної провідності (рис.1) дають уявлення про характер залежності питомої електричної провідності від природи електроліту і його концентрації для 25°C (298K).

Аналіз ізотерм дозволяє зробити наступні висновки:

1. Питома електрична провідність максимальна для розчинів сильних кислот і дещо менше – сильних підстав, що пояснюється повною дисоціацією цих електролітів і високою рухливістю іонів H_3O^+ и OH^- .
2. Найменші значення у всьому діапазоні концентрацій має питома електрична провідність розчинів слабких електролітів (CH_3COOH) у зв'язку з низькою концентрацією іонів ($\alpha \ll 1$).

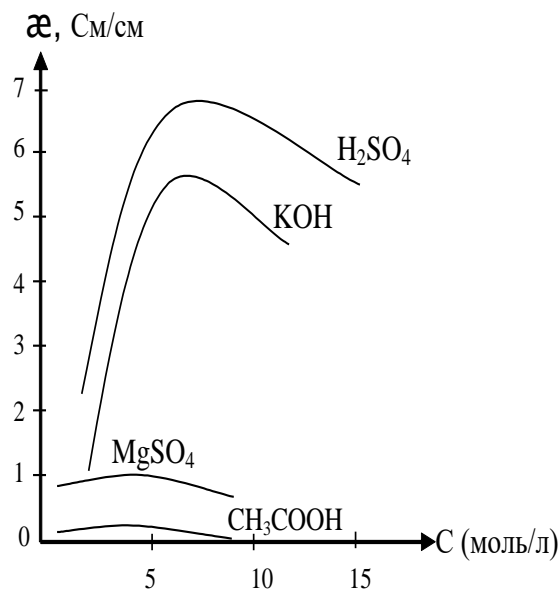


Рис.1. Залежність питомої електричної провідності від концентрації розчину для деяких електролітів

3. Питома електрична провідність зростає зі збільшенням концентрацією до деяких максимальних значень, що відповідає збільшенню кількості іонів в одиниці об'єму розчину. Досягнувши максимуму, питома електрична провідність починає зменшуватися, незважаючи на зростання концентрації електроліту. Подібний характер залежності κ від C пов'язаний у

сильних електролітів зі зменшенням рухливості іонів через зростаючого в міру збільшення концентрації розчину межіонної взаємодії, а у слабких електролітів – із зменшенням ступеня електролітичної дисоціації електроліту, а значить, і зменшенням кількості іонів в одиниці об'єму розчину.

Із збільшенням температури питома електрична провідність зростає. Це обумовлено, в основному, дегідратацією іонів і зменшенням в'язкості середовища, тобто зменшенням опору руху іонів.

Питома електрична провідність розчинів залежить від розведення. Розведення величина зворотна концентрації. Розведення позначається символом V або $1/C$ і характеризує об'єм розчину, що містить 1 моль електроліту. Коли розведення мало - розчин концентрований і ступінь дисоціації слабого електроліту мала. З ростом розведення α , спочатку збільшується, а, отже, і збільшується питома електрична провідність. При подальшому збільшенні розведення ступінь дисоціації наближається до одиниці і перестає рости, в той час як загальна кількість електроліту в одиниці об'єму зменшується, що викличе падіння електричної провідності.

Питома електрична провідність може бути обчислена теоретично:

$$\kappa = F \cdot C \cdot \alpha \cdot (\omega_A + \omega_K) \text{ – для слабких електролітів} \quad (4)$$

$$\kappa = F \cdot C \cdot f_a \cdot (\omega_A + \omega_K) \text{ – для сильних електролітів} \quad (5)$$

де F – число Фарадея, C – концентрація електроліту (моль/м³), α – ступінь дисоціації слабого електроліту, f_a – коефіцієнт активності сильного електроліта, ω_A и ω_K – абсолютна швидкість руху аніона і катіона в м/с при градієнті потенціалу 1 В/м.

Молярна електрична провідність.

Молярна електрична провідність – це електрична провідність 1 моль електроліту, що знаходиться в розчині між паралельними електродами з відстанню між ними 1 м і градієнті потенціалу 1 В/м.

Між питомою і молярною електричними провідностями існує проста залежність:

$$\lambda_m = \kappa / C, \quad (6)$$

де λ_m – молярна електрична провідність, $\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, κ – питома електрична провідність, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$; C – концентрація електроліту в розчині, $\text{моль} / \text{м}^3$.

Зазвичай молярна концентрація характеризується кількістю речовини в 1 дм^3 (1л), а не в 1 м^3 . В цьому випадку співвідношення має вигляд:

$$\lambda_m = \kappa / 1000 C. \quad (7)$$

Молярну електричну провідність, як і питому, можна розрахувати теоретично:

$$\lambda_m = \frac{F \cdot C \cdot \alpha \cdot (\omega_K + \omega_A)}{C} = F \cdot \alpha \cdot (\omega_A + \omega_K) \quad - \text{для слабких електролітів} \quad (8)$$

$$\lambda_m = \frac{F \cdot C \cdot f_a \cdot (\omega_K + \omega_A)}{C} = F f_a \cdot (\omega_A + \omega_K) \quad - \text{для сильних електролітів} \quad (9)$$

Значення молярної електричної провідності при розведенні розчину (при $C \rightarrow 0$) збільшується, прагнучи до постійної і специфічної для кожного електроліту величиною, званої граничної молярної електричною провідністю і позначається λ_m^0 (рис. 2).

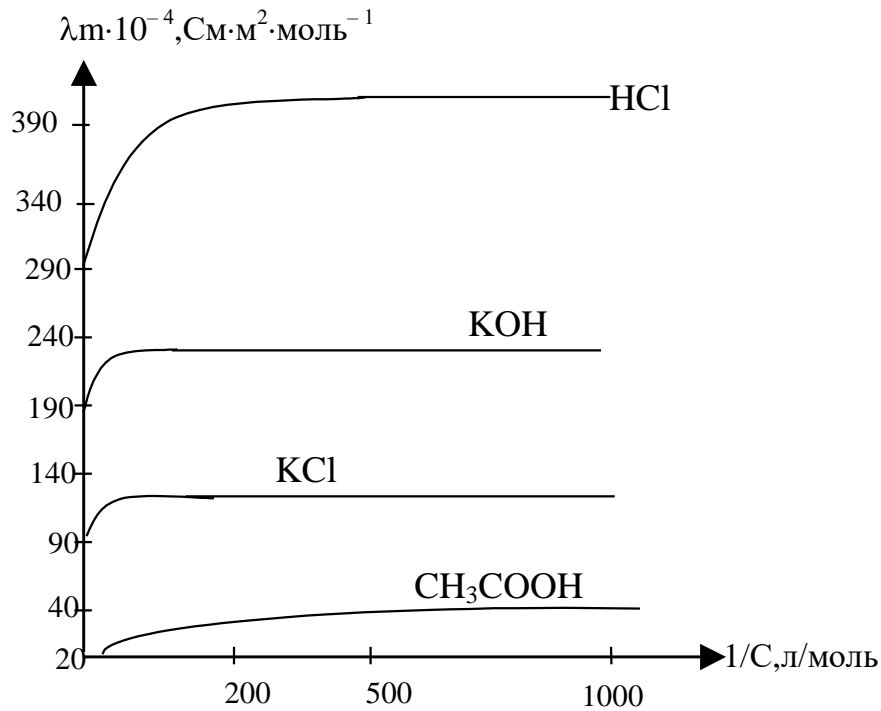


Рис. 2. Залежність молярної електричної провідності від концентрації розчину для деяких електролітів

Граничною молярною електричною провідністю електроліту називається значення молярної електричної провідності при нескінченному розведенні.

Збільшення значень λ_m пов'язано у слабких електролітів з ростом ступеня дисоціації при розведенні розчину ($\alpha \rightarrow 1$ при $C \rightarrow 0$), тобто пов'язано зі збільшенням кількості іонів, утворених 1 моль електроліту при даній температурі.

У сильних електролітів при нескінченному розведенні зменшується межіонна взаємодія, абсолютна швидкість руху іонів досягає граничних значень, тому молярна електрична провідність перестає залежати від концентрації і стає постійною величиною.

Молярна електрична провідність при даному розведенні λ_m завжди менше значення граничної молярної електричної провідності λ_m^0 . Відношення цих величин, тобто λ_m/λ_m^0 характеризує:

а) для слабкого електроліту – ступінь його дисоціації при даній концентрації розчину, тобто $\frac{\lambda_m}{\lambda_m^0} = \alpha$ (співвідношення Арреніуса)

б) для сильного електроліту – коефіцієнт активності (f_a) при даній концентрації, тобто $\frac{\lambda_m}{\lambda_m^0} = f_a$

Вважаючи, що при нескінченному розведенні розчинів слабких електролітів $\alpha \approx 1$, а розчинів сильних електролітів $f_a \approx 1$, рівняння (8), (9) приймуть наступний вигляд:

$$\lambda_m^0 = F \cdot (\omega_A + \omega_K). \quad (10)$$

Отже, при нескінченному розведенні розчинів електролітів їх молярна електрична провідність залежить тільки від абсолютних швидкостей руху іонів до електродів. Так як $U = F \cdot \omega$, то:

$$\lambda_m^0 = U_K + U_A \quad (11)$$

З останнього рівняння випливає, що сума рухливостей катіона і аніона дорівнює молярній електричній провідності при нескінченному розведенні.

Часто рухливість катіона U_K позначають λ_K^0 і називають граничною провідністю катіона, а рухливість аніона U_A позначають λ_A^0 і називають граничною рухливістю аніона. Тоді рівняння $\lambda_m^0 = U_K + U_A$ матиме такий вигляд:

$$\lambda_m^0 = \lambda_K^0 + \lambda_A^0 \quad (12)$$

Звідси випливає, що сума граничних провідностей катіона і аніона дорівнює молярній електричній провідності електроліту при нескінченному розведенні.

Рівняння (10), (11) та (12) виражають закон незалежності руху іонів у нескінченно розведених розчинах електролітів (закон Кольрауша).

Звідси, наприклад, гранична молярна електрична провідність оцтової кислоти буде дорівнює:

$$\lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COOH}) = \lambda_m^0(\text{H}^+) + \lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COO}^-).$$

Всі розглянуті вище параметри та характеристики розчинів, співвідношення щодо активності та питомої електричної провідності є справедливими також для біологічних рідин та біооб'єктів (з поправкою на в'язкість біологічних розчинів).

4. Електрична провідність біологічних об'єктів і її використання в медико-біологічних дослідженнях

Багато біологічних рідких середовищ (кров, спинномозкова рідина та інші) є електролітами. Як відомо, носії струму в електролітах - це позитивні і негативні іони, які виникають у результаті електролітичної дисоціації. Тому внутрішнє середовище організму має характер іонної провідності, тобто є провідником другого роду. У проведенні струму беруть участь дисоційовані неорганічні іони калію, натрію, хлору, карбонатів, фосфатів, а також іони органічних кислот, білки та інші органічні сполуки.

Відповідно до законів електричної провідності краще проводять струм тканини невеликої щільності, що містять багато води і високорухливих іонів. Це кров, лімфа, м'язи, підшкірна клітковина. Низька електрична провідність спостерігається у нервової тканини, жиру, кістки і шкіри (табл. 2).

При діабеті електрична провідність сечі також знижена до $0,9 \dots 1,4 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ через підвищений вміст цукру, що є неелектролітом.

Таблиця 2.

Питома електрична провідність біологічних рідин тканин при 37°C

Біосубстрат	κ , $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$
Сеча	2,00
Спинно-мозкова рідина	1,80
Плазма крові	1,55
Шлунковий сік	1,15
М'язова тканина	0,70
Цільна кров	0,54
Нервова тканина	$4 \cdot 10^{-2}$
Жирова тканина	$2 \cdot 10^{-2}$
Шкіра	$3 \cdot 10^{-4}$
Кістка	$5 \cdot 10^{-7}$

Дослідження, проведені на шлунковому соку, показали, що його електрична провідність і загальна кислотність при наявності вільної соляної кислоти величини пов'язані. Питома електрична провідність менше $0,8 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ вказує на гіпокислотність, значення в межах $0,8 - 1,0 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ – на нормальну кислотність і понад $1,3 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ – гіперкислотність.

У практичній медицині широко використовується метод реографії. Реографія – метод дослідження кровопостачання органів, в основі якого лежить принцип реєстрації змін електричного опору тканин в зв'язку з мінливим кровонаповненням. Чим більше приплив крові до тканин, тим менше їх опір.

Кондуктометрія широко використовується для визначення ступеня і константи дисоціації біологічно активних речовин, ізоелектричних точок амінокислот, пептидів і білків, концентрації і розчинності лікарських препаратів.

У санітарно-гігієнічних лабораторіях метод кондуктометрії використовується також для контролю процесу очищення і якості води, вмісту шкідливих домішок в повітрі, воді, харчових продуктах.

Визначення електропровідності біологічних тканин – непросте завдання. При цьому доводиться враховувати цілий ряд специфічних особливостей. Основу характерних лише для живих об'єктів властивостей (збудливість, скорочуваність) становлять ефекти, що мають електричну природу. Тому, опір живих клітин і тканин чутливий до дії електричного струму, особливо чутливі легко збудливі тканини: нерви і м'язи, а це означає, що при вимірюваннях потрібно використовувати досить низькі напруги. Електропровідність окремих ділянок залежить від опору шкіри і підшкірного шару в місцях накладання електродів. Опір шкіри, в свою чергу, визначається віком, товщиною, пітливістю тощо. Біологічні тканини мають досить неоднорідну електропровідність. В них складним чином чергуються ділянки з високою провідністю (біологічні рідини) і низькою (шкіра, кісткова і жирова тканини, мембрани клітин та клітинних органодів). Вимірювання електропровідності, тобто кондуктометрія, широко використовується при вивченні процесів, які відбуваються в живих клітинах і тканинах під час зміни фізіологічного стану в результаті дії деяких хімічних речовин, а також за умови патологічних процесів. За динамікою зміни електричного опору шкіри судять про так звані шкірно-гальванічні реакції, в яких відображаються емоції, втома та інші стани організму. В області рефлексотерапії вимірюють електричний опір для знаходження "активних точок". З року в рік арсенал досліджень електричних властивостей біологічних тканин невпинно зростає.

Особливо цікавою і складною задачею є дослідження електричних властивостей клітини. Не так давно вдалося виміряти електричний опір плазматичних мембран різних клітин.

Будемо позначати R_m опір одиниці мембранної поверхні незалежно від її товщини l , яку інколи неможливо виміряти точно (наприклад, при визначені трансмембранного опору), тобто $R_m = \rho \cdot l$, а C_m – електроємність одиниці мембранної площі. Значення R_m та C_m для різних біооб'єктів наведені в табл. 3.

Таблиця 3.

Біооб'єкт	R_m [Ом·м ²]	C_m [Ф/м ²]
Плазмолема нейрона п'явки	$1.7 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
Мотонейрон золотої рибки	$6 \cdot 10^8$	—
Гладкі м'язові волокна ссавців	10^7	$30 \cdot 10^{-2}$
Тонічне м'язове волокно	$2.9 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^{-2}$

Від величин R_m та C_m суттєво залежать основні фізіологічні властивості клітинних структур, наприклад, швидкість поширення збудження, проникність мембрани тощо.

Електрична провідність біологічних об'єктів в нормі і патології

Живий організм з точки зору електрохімії можна розглядати як систему, що складається з клітин і міжклітинного простору, заповнених розчинами електролітів. У загальну електропровідність вносять вклад неорганічні іони: калію, натрію, хлору, карбонатів, фосфатів; а також іони органічних кислот, білків та інших органічних сполук. Великий вплив на електричну провідність біологічних середовищ надають між- і внутрішньоклітинні мембрани, особливо при використанні постійного струму. В цьому випадку на мембранах під дією постійного електричного поля за рахунок перерозподілу іонів виникає наростаюча до деякої межі електрорушійна сила (ЕРС) протилежного напрямку, що зменшує електричну провідність системи в цілому.

Відповідно до законів електричної провідності краще проводять струм біорідини і тканини невеликої щільності, що містять багато води і високорухливих іонів.

Вивчення електропровідних властивостей тканин і органів живих організмів має велике значення для розуміння особливостей їх будови і функціонування в нормі і патології. Так, питома електрична провідність сечі в нормі лежить в межах 1,6...2,3 См/м. При захворюваннях нирок (нефрит, нефросклероз, гломерулонефрит) електрична провідність може зменшуватися до 0,9...1,4 См/м, що пов'язано зі зменшенням концентрації *NaCl* і збільшенням вмісту білка. При діабеті електрична провідність сечі також знижена до 0,9...1,4 См/м через підвищений вміст цукру, що є неелектролітом.

Електрична провідність шлункового соку залежить головним чином від вмісту в ньому вільної соляної кислоти. У нормі питома електрична провідність шлункового соку становить 1,0...1,25 См/м. Значення понад 1,25 См/м вказує на гиперкислотність, в межах 0,8...1,0 – на гипокислотність, а менше 0,8-свідчать про безкислотності.

Показано, що при запальних процесах електрична провідність клітин спочатку зменшується внаслідок набухання клітин і збільшення клітинного об'єму, потім збільшується в зв'язку з ростом проникності мембран.

Електрична провідність крові змінюється в процесі згортання. На визначенні електричної провідності крові засноване вивчення кровонаповнення органів і судин. Електрична провідність цільної крові менше, ніж інших клітинних рідин, тому при наповненні судин кров'ю їх електричний опір підвищується.

Визначення електричної провідності тканин широко використовується в діагностиці. Електрична провідність більшості тканин і середовищ організму лежить в основі таких фізіотерапевтичних методів лікування, як іонофорез, Електростимуляція, діатермія, ультрависокочастотна терапія і т. п.

Вимірювання електричного опору шкіри має велике практичне значення для клінічної рефлексології, так як дозволяє об'єктивно визначати місцезнаходження біологічно активних (акупунктурних) точок на нашому тілі. В області акупунктури (1...3 мм²) шкіра має низький електроопір (1...3 кОм), тоді як інші ділянки шкіри мають електроопір 20...100 кОм.

Знання і розуміння основних закономірностей електричної провідності клітин і тканин необхідно для того, щоб освоїти відповідні розділи таких курсів, як фізіологія людини, патофізіологія, фізіотерапія, загальна і комунальна гігієна.

Електроліти в організмі. Слина як розчин електролітів (приклад).

Електроліти входять до складу всіх клітин і тканин організму, складаючи більше 4% їх маси. Вони відіграють певну роль у підтримці осмотичного тиску, який впливає на розподіл у клітинах води та розчинених речовин. Крім пасивного транспорту, в організмі має місце активний транспорт. Катіони натрію, калію, кальцію, аніони хлору беруть участь у виникненні мембранних потенціалів клітин, провідності нервових волокон. Електролітний обмін тісно пов'язаний з обміном органічних речовин. Значною мірою це обумовлено впливом електролітів на ступінь дисоціації, гідратацію, розчинність, стійкість багатьох внутрішньоклітинних і позаклітинних білків. Велике значення при цьому має валентність і хімічна природа іонів. Цими факторами визначається також здатність іонів взаємодіяти з ВМС-білками і нуклеїновими кислотами.

Слина – секрет слинних залоз, що виділяється в порожнину рота. Слина має рН від 5,6 до 7,6. На 98,5% і більше складається з води, містить солі різних кислот, мікроелементи і катіони деяких лужних металів, муцин (формує і склеює харчову грудку), лізоцим (бактерицидний агент), ферменти амілазу і мальтазу, що розщеплюють вуглеводи до оліго- і моносахаридів, а також інші ферменти, деякі вітаміни. Також склад секрету слинних залоз змінюється в залежності від характеру подразника. Склад: вода, білки, муцин, холестерин,

глюкоза, амоній, сечова кислота, солі натрію, солі калію, солі кальцію, солі магнію, хлориди, гіброкарбонати, сечовина.

Перелік основних медико-біологічних та контрольних досліджень, де використовується кондуктометрія :

1. Вивчення кінетики ферментативної активності. Жири, ліпаза, жирні кислоти + гліцерин. Ацетилхолін ацетилхолінестераза холін + CH_3COOH . В обох випадках спостерігається збільшення питомої електропровідності κ .
2. Визначення вмісту електролітів: у плазмі та сироватці крові, шлунковому соку, тканинній рідині та ін., в біологічних об'єктах, а також у водах мінеральних джерел і в продуктах харчування.
3. Вимірювання опору лежить в основі реографії – методу, що дозволяє визначити кровонаповнення органів і перерозподіл крові між органами.
4. При вивченні дії ушкоджуючих факторів внаслідок теплових і хімічних опіків, механічних травм, дії жорсткого електромагнітного випромінювання; електрична провідність пошкоджених тканин збільшується через порушення проникності, а в деяких випадках і цілісності мембран. При запальних процесах спочатку спостерігається зниження електричної провідності, що пояснюється переходом частини міжклітинної рідини всередину клітин, а потім-підвищення – що, як і в разі дії факторів, що ушкоджують, пояснюється порушенням проникності мембран.
5. При аналізі та контролі якості лікарських препаратів: слабких основ-кофеїну, амідопіріну; солей слабких основ-дибазолу, папаверина та ін.
6. В санітарно-гігієнічних лабораторія: для контролю процесу очищення та якості води, для визначення вмісту шкідливих домішок: у повітрі, воді, харчових продуктах.

Вимірювання електричної провідності (кондуктометрія)

Електричну провідність розчинів на практиці визначають за значенням їх опору електричному струму, що протікає між двома електродами, зануреними в розчин.

Вимірювання опору розчинів виробляють компенсаційним методом за допомогою моста опору Уїтстона, модернізованого Кольраушем для вимірювання опору розчинів електролітів (рис. 3). Відмінність установки Кольрауша полягає у використанні змінного струму низької частоти замість постійного, щоб уникнути процесу електролізу і поляризації електродів.

Нуль-інструментом може служити гальванометр, осцилограф або телефон.

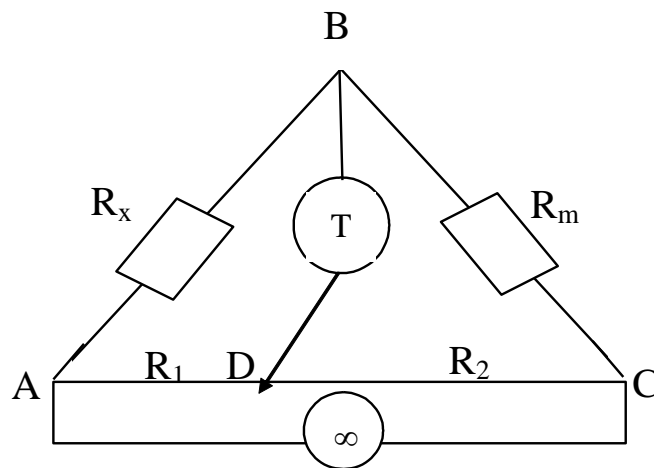


Рис. 3. Міст Уїтстона.

АС – реохорд; Т – телефонна трубка; ∞ – генератор змінного струму; Д – скользящий контакт.

Установка Кольрауша містить 4 опора: R_m – підбирається експериментально опір на магазині опорів, R_1 і R_2 – опору ділянок реохорда, які змінюються пересуванням ковзного контакту Д для врівноваження опору плеча

BC, що містить відоме опір R_m і плеча AB, що містить вимірюваний опір R_x . При компенсації моста спостерігається умова:

$$\frac{R_x}{R_m} = \frac{R_1}{R_2} \text{ або } R_x = R_m \frac{R_1}{R_2}$$

В цьому випадку струм через діагональ моста ВД не протікає, що фіксується по зникненню звуку в телефонній трубці.

Конструкції вимірювальних осередків дуже різноманітні (рис. 4). У прямій кондуктометрії зазвичай застосовують осередки з жорстко закріпленими в них електродами. У методах кондуктометричного титрування поряд з осередком цього типу часто використовують так звані заглибні електроди, що дозволяють проводити титрування в будь-яких судинах, в яких можна розмістити електроди.

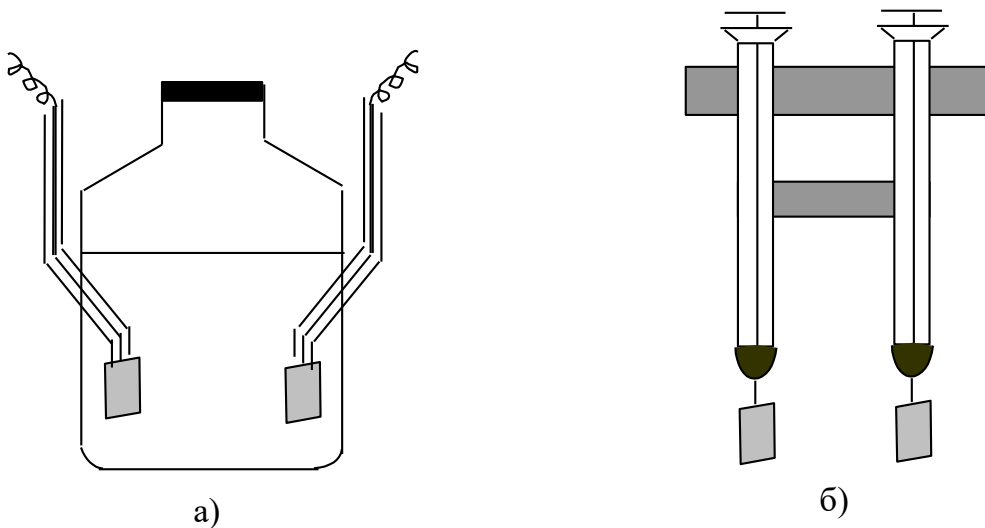


Рис. 4. Комірки для кондуктометричних вимірювань: а – комірка з жорстко закріпленими електродами; б – занурювальні електроди

Прямі визначення питомої електричної провідності дуже складні, так як опір розчину залежить не тільки від швидкості руху іонів, але і від їх шляху.

Шлях іонів обумовлений геометрією судини, площею електродів і відстанню між ними.

Витримати площу електродів 1 м^2 (1 см^2) і відстань між ними 1 м (1 см) з високою точністю неможливо. Однак при стаціонарному розташуванні електродів величина $\frac{\ell}{S}$ кондуктометричної комірки, необхідна для розрахунку питомої електричної провідності, для різних розчинів електролітів є постійною величиною, позначається K_c і називається постійною кондуктометричної комірки (судини). Постійна судини (K_c) показує, у скільки разів опір, що вимірюється в даному посудині, більше, ніж виміряне в стандартному з площею електродів 1 м^2 (1 см^2) при відстані між ними 1 м (1 см).

$$\text{Оскільки } R = \rho \frac{\ell}{S}, \text{ а } \frac{\ell}{S} = K_c \text{ маємо } R = \rho \cdot K_c$$

$$\text{або } R = K_c / \kappa, \text{ так як } \frac{1}{\rho} = \kappa, \text{ звідси } K_c = R \cdot \kappa$$

На практиці постійну судини K_c визначають по електричній провідності стандартного розчину хлориду калію, питома електрична провідність якого при різних температурах є довідковою величиною:

$$K_c = \kappa_{KCl} \cdot R_{KCl}.$$

Таким чином, питома електропровідність розчину електроліту залежить від сумарної концентрації розчинених речовин, геометрії провідного об'єму, природи іонів і розчинника, температури і напруженості поля. Такі основні положення електрохімії, що використовуються в класичній кондуктометрії розчинів, в тому числі і біологічного походження.

5. Сучасні прилади для вимірювання електропровідності розчинів

Що стосується апаратної частини класичного методу, тобто серійних кондуктометрів, то їх різні варіанти зводяться в основному до різноманіття дизайну, точності вимірювання, суміщених функцій (солемір або *pH*-метр), вартості і портативності. На світовому ринку кондуктометри представлені широким спектром різних за призначенням приладів. Найбільш відомі європейські виробники, зосереджені в Німеччині (HANNA, WTW), Швейцарії (METTLER TOLEDO), Фінляндії (LEKI), Угорщини (RADELKIS), Росії (МАРК, АТЛАНТ, ЕКСПЕРТ), Україні (контроль водопідготовки в енергетиці), а також в США (ОАКТОН, EUTECH, НАСН) та Японії (HORIBA). На рис. 5 представлені деякі відомі моделі кондуктометрів.



Рис. 5 Портативні кондуктометри: ОАКТОН, HANNA, МАРК, HORIBA.

Принцип вимірювання, що лежить в основі конструкції всіх відомих серійних кондуктометрів має одну загальну суть. Це подача на рідке середовище в погрузну або наливну комірку з двома або чотирма (за схемою Веннера) електродами з жорстко фіксованою геометрією стабілізованої і каліброваної за амплітудою невеликої напруги (0,5...5В), найчастіше, синусоїдальної форми (50, 400 Гц або 1...3 кГц), двополярного симетричного

меандру або імпульсної напруги. Далі вимірювання провідності проводиться або способом вольтметра-амперметра шляхом прямого вимірювання струму через середовище між електродами, або способом врівноваженого моста Уїтстона або Кольрауша.

Існує два основних методи кондуктометрії – контактний і безконтактний. Безконтактні методи кондуктометрії пов'язані із застосуванням ВЧ ЕМП і мають меншу точність, ніж контактні. Застосування цих ВЧ методів в кондуктометрії клітини, наприклад, недоцільно, тому що внаслідок впливу змінних ЕМП можуть виникнути різні ефекти релаксації різнокаліберних молекул і взаємодії реактивних опорів клітини, – ефекти, що мають велику частотну дисперсію і тому важко враховуються з точки зору провідності. Крім того, при ВЧ кондуктометрії вимірюється не провідність розчину, а сукупність багатьох його властивостей і комірки, включаючи і ДП, тому інтерпретація отриманих результатів тут більш складна в порівнянні з контактною кондуктометрією. Значить, для кондуктометрії клітин кращий контактний метод безпосереднього проходження струму через клітину, обмежену мембраною, що дасть можливість прямої електромеханічної дії поля (за допомогою прискорення гідратованих іонів) на мембрану з метою електропорації.

6. Приклади застосування методу електропровідності для аналітичних і фізико-хімічних вимірювань (кондуктометрія).

Як встановлено вище, кондуктометрія – це сукупність електрохімічних методів, заснованих на вимірюванні опору досліджуваних об'єктів, що представляють собою провідники другого роду. За значенням опору розчину електричному струму, що протікає між двома електродами, зануреними в розчин, визначають електричну провідність. За допомогою кондуктометрії можна визначити концентрацію розчиненої речовини, константу і ступінь

дисоціації слабого електроліту, розчинність і твір розчинності важкорозчинних речовин, іонний твір води та інші фізико-хімічні величини.

Кондуктометричне визначення ступеня і константи дисоціації слабого електроліту.

Залежність між молярною електричною провідністю λ_m та концентрацією слабого електроліту може бути встановлена законом розведення Оствальда. Наприклад, для одновалентних електролітів:

$$K_d = \frac{\alpha^2 C}{1 - \alpha}$$

де K_d – константа рівноваги дисоціації слабого електроліту, α – ступінь дисоціації, C – молярна концентрація електроліту. Підставляючи в це рівняння співвідношення Арреніуса $\alpha = \lambda_m / \lambda_m^0$, отримаємо:

$$K_d = \frac{(\lambda_m / \lambda_m^0)^2 \cdot C}{1 - (\lambda_m / \lambda_m^0)}$$

Цей вираз може бути використано для визначення константи дисоціації слабого електроліту, якщо виміряти електричну провідність розчину заданої концентрації. Значення λ_m^0 можна отримати із закону Кольрауша.

Кондуктометричне титрування

Вимірювання електричної провідності розчинів широко застосовують в титриметрическом аналізі для визначення точки еквівалентності (кондуктометрическое титрування). Метод кондуктометричного титрування заснований на тому, що в розчині, завдяки йде в ньому хімічної реакції, іони, що рухаються з однією швидкістю замінюються іонами, що рухаються з іншою швидкістю. У методах кондуктометричного титрування вимірюють електричну провідність розчину після додавання невеликих певних порцій титранту і знаходять точку еквівалентності графічним методом за допомогою кривої в

координатах κ – V титранту. Практично в цьому методі можуть бути використані такі хімічні реакції, в ході яких досить помітно змінюється електрична провідність розчину або відбувається різка зміна електричної провідності після точки еквівалентності (реакції кислотно-основної взаємодії, осадження і т.д.).

На рис. 6 наведені криві залежності питомої електричної провідності κ від об'єму титранту, що приливається. При титруванні сильної кислоти сильною основою (рис. 6 а) на кривій титрування утворюється мінімум (точка еквівалентності), відповідний заміні іонів водню на менш рухливі іони утворюється солі (гілка АВ):

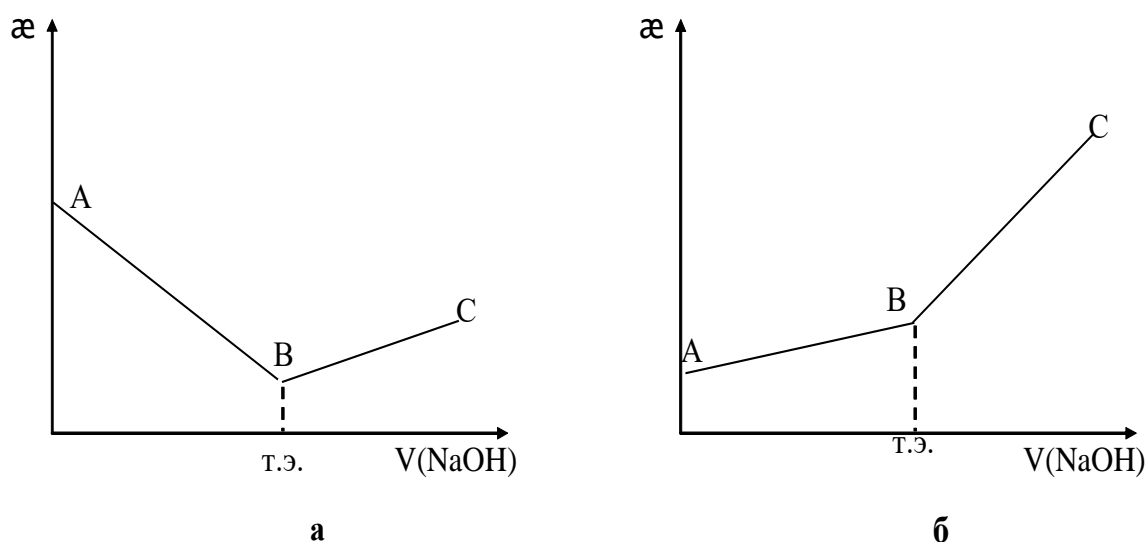
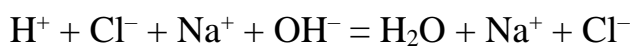
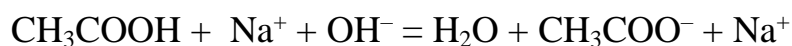


Рис. 6. Криві кондуктометричного титрування



Після точки еквівалентності починається різкий підйом електричної провідності (гілка ВС) тому що в розчині буде наростати концентрація іонів Na^+ і OH^- . Однак зростання по гілці ВС буде більш пологим, ніж зменшення по гілці АВ, так як рухливість іона OH^- майже в 2 рази менше рухливості іона водню.

При титруванні слабкої кислоти сильною основою (рис. 6б) збільшується електрична провідність розчину, що пояснюється значною дисоціацією утворюється солі в порівнянні з дисоціацією вихідної речовини (гілка АВ):



Після точки еквівалентності починається різкий підйом електричної провідності (гілка ВС) тому що в розчині буде наростати концентрація іонів Na^+ і OH^- .

Кондуктометричне титрування використовують для визначення концентрації забарвлених, каламутних розчинів, в яких зміна кольору індикатора маскується, в тому числі і в біологічних рідинах.

7. Контрольні теми для запитання (дати розгорнуту відповідь).

1. Рідини і тканини організму як провідники II роду.
2. Абсолютна швидкість руху іонів і фактори визначають її. Розмірність. Абсолютна швидкість руху H^+ і OH^- . Рухливість іонів.
3. Питома електрична провідність і її залежність від абсолютної швидкості руху іонів, від концентрації (розведення), температури.
4. Молярна електрична провідність, її зв'язок з питомою електричною провідністю, залежність від абсолютної швидкості руху іонів і розведення (концентрації).
5. Молярна електрична провідність при нескінченному розведенні. Закон Кольрауша.
6. Електрична провідність біологічних рідин і тканин в нормі і патології.
7. Суть методу кондуктометрії, основні схеми вимірювання питомої електропровідності.
8. Кондуктометрия, кондуктометричне визначення ступеня і константи дисоціації слабких електролітів.

9. Криві кондуктометричного титрування.

8. Запитання для самостійної підготовки.

1. Які фізичні основи виникнення електропровідності біологічних рідин?

2. Назвіть природні елементи (іони) в складі електропровідних рідин та опишіть ступінь впливу їх на електропровідність біоб'єктів.

3. Що показали експериментальні дослідження провідності біологічних рідин (норма, патологія, діагностика)?

4. Як можна охарактеризувати сучасний стан інструментального парку приладів для кондуктометрії (прилади, фірми, принцип дії)?

Література:

1. Smolyaninova Y. I., Shigimaga V. A., Kolesnikova A. O., Popivnenko L. I., Todrin A.F. Electric Conductivity and Resistance of Mouse Oocyte Membranes to Effect of Pulsed Electric Field in Cryoprotectant Solutions // *Probl. Cryobiol. Cryomed.* – 2018. – V. 28. – No 4. – P. 311 – 321.
2. Шигимага В. А. Метод и аппаратура импульсной кондуктометрии одиночных клеток животных и жидких сред // *Акт. вопр. биофизики и химии: мат. VII междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 26 – 30 апр. 2011 г.* – Севастополь, 2011. – С. 25 – 26.
3. Шигимага В. О. Біотехнічний комплекс імпульсної кондуктометрії і електроманімуляції з клітинами тварин. Автореф. дис. д.т.н. 05.11.17. – Харків.: ХНТУСГ. – 2014. – 36 с.
4. Shigimaga V.A. Conductometry in Pulsed Electric Field with Rising Strength: Bioelectrochemical Applications // *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry.* - 2019. - V. 11. – N. 5. – P. 598 – 609.
5. Shigimaga V. A. Measurements of the capacitance of a biological cell by a pulse method // *Measurement Techniques.* – N. Y.: Springer New York, LCC, 2014. – V.57. – N 2. – P. 213 – 217.
6. Шигимага В. А., Мегель Ю. Е. Применение метода импульсной кондуктометрии для исследования электрических характеристик биологических клеток // *Праці Інституту електродинаміки НАН України.* – Київ. – 2012. – Вип. 31. – С. 147 – 155.
7. Shigimaga V. A. Pulsed conductometer for biological cells and liquid media // *Measurement Techniques.* – N. Y.: Springer New York, LCC, 2013. – V.55. – N11. – P. 1294 – 1300.
8. Smolyaninova E. I., Shigimaga V. A., Strikha O. A., Popivnenko L. I., Lisina E.G. Effect of Cryopreservation Stages by Vitrification in Ethylene Glycol and Sucrose Medium on 2-Cell Murine Embryos Electric Conductivity // *Problems of*

Cryobiology and Cryomedicine. – 2013. – V. 23, N. 3. – P. 228 – 239.

9. Колесникова А. А., Шигимага В. А., Смольянинова Е. И. Влияние стимуляции созревания на электропроводность и оплодотворяемость ооцитов мыши // Фундаментальные исследования. – Пенза. – 2013. – №4. – ч.4. – С. 896 – 899.

10. Shigimaga V.A. Pulsed conductometry in a variable electric field: outlook for the development of measurements // Measurement Techniques. – N. Y.: Springer New York, LCC, 2014. – V. 57. – N 10. – P. 1213 – 1218.

11. Shigimaga V. A. Differential pulsed conductometer for measurements of the conductivity of biological cells // Measurement Techniques. -N.Y.: Springer New York, 2017. - V. 60. – No.7. – P. 746 – 750.

12. HANNA instruments/Conductivity meter. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.hannainst.com/>

13. WTW Lab Products/Conductivity Measurements. - Режим доступа: \www/ URL: <http://www.wtw.de/en/home.html/>

14. METTLER TOLEDO/Conductivity meter. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.mt.com/conductivitymeters/>

15. RADELKIS Kft/ Instruments. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.radelkis.hu/>

16. Сім вольт / Кондуктометры. – Режим доступа: \www/ URL: <http://simvolt.com.ua/rus/conduct.html/>

17. Thermo Scientific/ Eutech instruments water analysis solution. - Режим доступа: \www/ URL: <http://www.eutechinst.com/>

18. HACH / Conductivity. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.hach.com/>

19. OAKTON instruments /Conductivity/TDS. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.4oakton.com/>

20. Инженерный центр приборостроения и компьютеризации/Приборы. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.izpk.com.ua/index.php/>

21. ALT Украина / Лабораторные кондуктометры. – Режим доступа:

\www/ URL: <http://lab.alt.ua/lab/catalog/>

22. Kosulina N. / Косуліна Н. Г. Electrophysical parameters of materials and bioobjects, methods and means of their measurement in electrotechnological processes. / Электрофизические параметры материалов и биообъектов, методы и средства их измерения. SWorldJournal (Svishtov, Bulgaria). Issue 15, Part 1. September 2022. – Pp. 14 – 20.

<https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj15-01-030>,

DOI: 10.30888/2663-5712.2022-15-01-030

23. Косулина Н.Г., Косулин С.В. / Kosulina N., Kosulin S. Определение биотропных параметров импульсного электрического поля для повышения иммуноглобулинов в молозиве коров / Determination of biotropic parameters of a pulsed electric field for increasing immunoglobulins in cow coloster. Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – No 103 (2022). – Pp. 90 – 93.

<https://www.european-science.org>,

DOI: 10.5281/zenodo.7247737

24. Косулина Н. Г., Косулин С. В. / Kosulina N., Kosulin S. Применение низкоэнергетических волновых излучений в медицине и животноводстве. Application of low-energy radio-wave emissions in medicine and animal husbandry. The scientific heritage (Budapest, Hungary). No 99 (99) (2022). – Pp. 22 – 25.

<https://www.tsh-journal.com>, DOI: 10.5281/zenodo.7234435

25. N. Kosulina, V. Sukhin, S. Kosulin. [Methods for assessing the state of agricultural animal microobjects](#) / Методи оцінки стану мікроб'єктів сільськогосподарських тварин. – Sworld-Us Conference proceedings, 2023. 2023/1/30. usc16-01. 7-11.

DOI: <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2023-16-01-022>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Работа № 1. Кондуктометрическое определение степени и константы диссоциации уксусной кислоты

Цель работы: научиться определять сопротивление проводников второго рода и использовать данные кондуктометрических измерений для расчета константы и степени диссоциации слабых электролитов.

Задание 1. Определить постоянную сосуда K_c с 0,001М раствором KCl .

Электродный сосуд дважды промыть небольшим количеством раствора 0,001М KCl , после чего заполнить раствором до метки, закрыть крышкой, электроды присоединить к клеммам R_x измерительного прибора Р-38. Измерить и записать значение R_m , а также значение отношения плеч $R_1/R_2 = m$ по шкале реохорда, работая с прибором строго по инструкции. Из табличных (табл.3) данных найти α_{KCl} и рассчитать K_c по формуле:

$$K_c = \alpha_{KCl} \cdot R_m \cdot m.$$

Таблица 3

Удельная электрическая проводимость 0,001М KCl
в зависимости от температуры

температура	удельная электрическая проводимость α , См·м ⁻¹
18 ⁰	0, 0127
19 ⁰	0, 0130
20 ⁰	0, 0133
21 ⁰	0, 0136
22 ⁰	0, 0139
23 ⁰	0, 0142

24 ⁰	0, 0145
25 ⁰	0, 0148

Задание 2. Определить степень и константу диссоциации уксусной кислоты.

Электродный сосуд и электроды промыть дистиллированной водой, затем ополоснуть раствором 0,1М уксусной кислоты, после чего сосуд заполняют этим раствором до метки. Электроды должны быть полностью покрыты раствором. Провести измерение сопротивления раствора уксусной кислоты также, как измеряли сопротивление раствора хлорида калия.

$$R_m =$$

$$m_1 =$$

Рассчитать сопротивление раствора уксусной кислоты по формуле:

$$R_x = R_m \cdot m;$$

$$R_x =$$

Затем провести последовательный расчет α , λ_m , α и K_α по уравнениям:

$$\alpha(\text{CH}_3\text{COOH}) = \frac{K_\alpha}{R_{x(\text{cp})}} =$$

$$\lambda_m = \alpha (\text{CH}_3\text{COOH}) / 1000 \cdot C (\text{CH}_3\text{COOH}) =$$

$$\alpha = \lambda_m / \lambda_m^0 =$$

$$K_\alpha = \frac{\alpha^2 C}{1 - \alpha} =$$

Величину молярной электрической проводимости при бесконечном разведении λ_m^0 для уксусной кислоты вычислить по уравнению Кольрауша:

$$\lambda_m^0 = \lambda_K^0 + \lambda_A^0$$

Значения подвижностей ионов H^+ и CH_3COO^- взять из справочной табл. 4.

Таблица 4

Подвижность ионов в зависимости от температуры

температура	подвижность ионов U ($См \cdot м^2 \cdot моль^{-1}$)	
	H^+	CH_3COO^-
18 ⁰	$315 \cdot 10^{-4}$	$35 \cdot 10^{-4}$
19 ⁰	$320 \cdot 10^{-4}$	$35,9 \cdot 10^{-4}$
20 ⁰	$324,8 \cdot 10^{-4}$	$36,6 \cdot 10^{-4}$
21 ⁰	$329,8 \cdot 10^{-4}$	$37,4 \cdot 10^{-4}$
22 ⁰	$334,7 \cdot 10^{-4}$	$38,2 \cdot 10^{-4}$
23 ⁰	$339,7 \cdot 10^{-4}$	$39,1 \cdot 10^{-4}$
24 ⁰	$345,0 \cdot 10^{-4}$	$40,1 \cdot 10^{-4}$
25 ⁰	$349,8 \cdot 10^{-4}$	$40,9 \cdot 10^{-4}$

Экспериментальное значение K_d сравнить со справочным и рассчитать ошибку опыта в % ($K_d(CH_3COOH)_{справочн.} = 1,75 \cdot 10^{-5}$ моль/л.

Работа №2. Определение концентрации соляной кислоты кондуктометрическим титрованием.

Цель работы. Научиться определять концентрацию различных электролитов кондуктометрическим методом.

В стакан налить 10 мл раствора, добавить 100 мл дистиллированной воды (разбавление необходимо для того, чтобы добавление титрующего раствора не вызвало сильного изменения исходного объема и не уменьшило тем самым общей исходной концентрации ионов), тщательно перемешать, ввести электроды, после чего присоединить их к зажимом R_x реохордного моста и определить сопротивление раствора. Порядок работы на измерительном приборе Р-38 описан в лабораторной работе №1.

В стакан с кислотой добавить из бюретки 4 мл 0,1М раствора $NaOH$. Раствор тщательно перемешать и определить сопротивление раствора. Далее добавлять объемы щелочи, указанные в таблице 3.

После каждого добавления раствора щелочи определить R_x раствора. Экспериментальные данные внести в таблицу 3.

Таблица 3

мл добавленной щелочи, ΔV	Общий объем щелочи, V	R_m	$m = \frac{r_1}{r_2}$	R_x
0	0			
4	4			
2	6			
2	8			
1	9			
0,5	9,5			
0,3	9,8			
0,2	10,0			
0,2	10,2			
0,2	10,4			
0,2	10,6			
0,4	11,0			
1,0	12,0			

Построить график зависимости R_x от объема щелочи. По максимуму сопротивления определить объем щелочи, пошедший на титрование кислоты из кривой кондуктометрического титрования (см. рис. 6).

Рассчитать концентрацию соляной кислоты по формуле:

$$C(HCl) = \frac{C(NaOH) \cdot (NaOH)}{(HCl)}$$

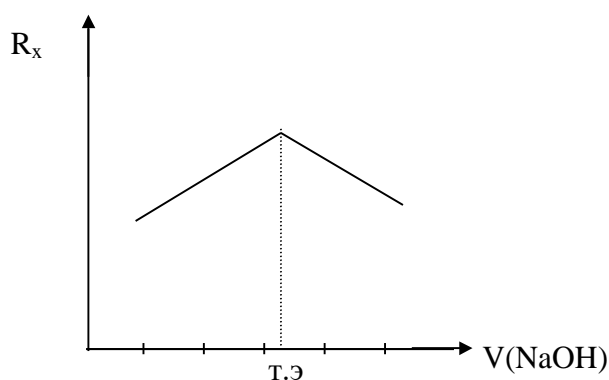


Рис. 6. Кривая кондуктометрического титрования

ТЕСТОВЫЙ САМОКОНТРОЛЬ

1. От каких факторов зависит подвижность иона в растворе:
 - а) от вязкости растворителя
 - б) от температуры
 - в) от величины заряда иона
 - г) от величины гидродинамического радиуса иона

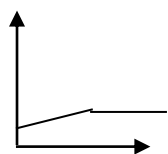
2. Укажите формулы, выражающие закон Кольрауша:
 - а) $\lambda_m^0 = F(\omega_A + \omega_K)$
 - б) $\alpha = \lambda_m / \lambda_m^0$
 - в) $\lambda_m^0 = U_K + U_A$
 - г) $\lambda_m = \alpha / C$

3. Как изменяются значения абсолютных скоростей ионов в водных растворах в ряду Na^+ , Rb^+ , OH^- , H^+ :
 - а) уменьшаются
 - б) не изменяются
 - в) увеличиваются

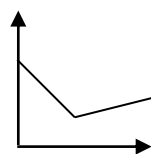
4. Как изменяется молярная электрическая проводимость растворов электролитов с изменением температуры:
 - а) при повышении температуры увеличивается
 - б) при понижении температуры увеличивается
 - в) при повышении температуры уменьшается
 - г) при понижении температуры уменьшается

5. Сравните электрическую проводимость 0,1М растворов H_2SO_4 и Na_2SO_4 :
 - а) выше у Na_2SO_4
 - б) ниже у Na_2SO_4
 - в) одинаковы
 - г) выше у H_2SO_4

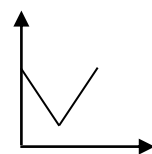
6. Какой из графиков объясняет ход кривой кондуктометрического титрования раствора CH_3COOH раствором $NaOH$



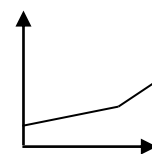
V(



V(



V(



V(

7. Вычислите абсолютную скорость движения ионов OH^- , если их подвижность равна $198,5 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$:
- $19,15 \cdot 10^2 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
 - $20,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
 - $486,15 \cdot 10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
 - $486,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
8. Вычислите удельную электрическую проводимость раствора пропионовой кислоты ($\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$) с концентрацией $1/34$ моль/л., если молярная электрическая проводимость этого раствора равна $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$:
- $2,68 \cdot 10^{-5}$
 - $2,68 \cdot 10^{-2}$
 - $2,29 \cdot 10^{-5}$
 - $2,29 \cdot 10^{-2}$
9. Вычислите степень электролитической диссоциации пропионовой кислоты, если подвижность ионов H^+ равна $349,8 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, а подвижность пропионат-ионов равна $40,9 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, молярная электрическая проводимость пропионовой кислоты равна $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$:
- $3,99 \cdot 10^{-2}$
 - $2,52 \cdot 10^{-2}$
 - $5,05 \cdot 10^{-2}$
 - $1,99 \cdot 10^{-2}$
10. В каком ряду биологических жидкостей удельная электрическая проводимость уменьшается:
- плазма крови, желудочный сок, цельная кровь, моча
 - желудочный сок, моча, плазма крови, цельная кровь
 - цельная кровь, желудочный сок, плазма крови, моча
 - моча, плазма крови, желудочный сок, цельная кровь?

ЗАДАЧИ

1. Рассчитайте молярную концентрацию HCl в растворе, если удельная электрическая проводимость раствора равна $0,277 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$, а молярная электрическая проводимость – $1,385 \cdot 10^{-2} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$.

Ответ 0,02 моль/л

2. Молярная электрическая проводимость $0,1 \text{ М}$ раствора CH_3COOH при 298 К равна $5,2 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$. Рассчитать константу диссоциации CH_3COOH и pH раствора.

Ответ $K_d = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$; $pH 2,88$

ЭТАЛОНЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Определить молярную электрическую проводимость 0,1М раствора $AgNO_3$ при 298К, если удельная электрическая проводимость этого раствора равна $1,097 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$.

Дано	Решение
$C_m(AgNO_3) = 0,1 \text{ моль/л}$ $\kappa = 1,097 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$	
$\lambda_m = ?$	<p>Удельная и молярная электрически проводимости связаны следующим соотношением: $\lambda_m = \kappa / C$,</p> <p>где C – концентрация раствора, моль/м³</p> <p>Следовательно, $\lambda_m = \kappa / C(AgNO_3) \cdot 1000$</p> $\lambda_m = \frac{1,097 \cdot \text{См}\cdot\text{м}^{-1}}{0,1 \text{ моль} / \text{л} \cdot 1000} = 1,097 \cdot 10^{-2} \text{ См}\cdot\text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$ <p style="text-align: right;">Ответ: $1,097 \cdot 10^{-2} \text{ См}\cdot\text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$</p>

Задача 2. Одинаковы ли удельная и молярная электрические проводимости 0,1М растворов CH_3COONa и CH_3COOH и 0,01М растворов KCl и HCl ? Изменятся ли эти величины с повышением температуры

Решение

а) Ацетат натрия сильный электролит. Это означает, что ионов (переносчиков электричества) в 0,1М раствора CH_3COONa больше, чем в растворе уксусной кислоты той же концентрации. Следовательно, κ и λ_m больше у CH_3COONa .

б) Электрическая проводимость 0,01М раствора HCl больше электрической проводимости 0,01М раствора KCl , так как скорость движения ионов H^+ больше скорости движения катионов K^+ .

в) С повышением температуры увеличивается скорость движения ионов, а у слабых электролитов, к тому же, возрастает степень диссоциации. Следовательно, с повышением температуры α и λ_m увеличивается.

Задача 3. Вычислить молярную электрическую проводимость иодида калия при бесконечном разведении (λ_m^0) и 298К, если известно, что подвижность катиона калия равна $73,5 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, а подвижность аниона иода – $76,9 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$.

Дано

$$U(K^+) = 73,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$U(I^-) = 76,9 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\lambda_m^0(KI) = ?$$

Решение

Согласно закону Кольрауша, что сумма подвижностей катиона и аниона равна молярной электрической проводимости при бесконечном разведении,

$$\text{находим: } \lambda_m^0(KI) = U(K^+) + U(I^-)$$

$$\lambda_m^0(KI) = 73,5 \cdot 10^{-4} + 76,9 \cdot 10^{-4} = 150,4 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\text{Ответ: } \lambda_m^0(KI) = 150,4 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

Задача 4. Определить степень и константу диссоциации NH_4OH в 0,01М растворе при 298К, если для этого раствора молярная электрическая

проводимость равна $11,2 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, а предельная молярная электрическая проводимость $271,2 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$.

Дано

$$C(\text{NH}_4\text{OH}) = 0,01 \text{ моль/л}$$

$$\lambda_m(\text{NH}_4\text{OH}) = 11,2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\lambda_m^0(\text{NH}_4\text{OH}) = 271,2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\alpha - ? \quad K_d - ?$$

Решение

Для слабого электролита степень диссоциации определяется соотношением Аррениуса:

$$\alpha = \frac{\lambda_m}{\lambda_m^0}$$

Связь между молярной электрической проводимостью и концентрацией слабого электролита установлена с помощью закона разбавления Освальда: $K_d = \frac{\alpha^2 \cdot C}{1 - \alpha}$

$$1) \alpha = \frac{11,2 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}}{271,2 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}} = 0,0413$$

$$2) K_d = \frac{(0,0413)^2 \cdot 0,01 \text{ моль/л}}{1 - 0,0413} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}$$

Ответ: $\alpha = 0,413$; $K_d = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}$

Задача 5. Удельная электрическая проводимость $0,02 \text{ М}$ раствора KCl при 298 К равна $0,277 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$, а его сопротивление $431,8 \text{ Ом}$. Вычислить удельную электрическую проводимость раствора уксусной кислоты, если сопротивление раствора уксусной кислоты в том же сосуде равно 750 Ом .

Дано	Решение
$T = 298\text{K}$	Удельная электрическая проводимость
$C(\text{KCl}) = 0,02$	раствора уксусной кислоты определяется по
моль/л	формуле:
$\alpha(\text{KCl}) = 0,277$	$\alpha(\text{CH}_3\text{COOH}) = \frac{K_c}{R(\text{CH}_3\text{COOH})}$,
$\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$	где K_c – постоянная сосуда, которую вычислим
$R(\text{KCl}) = 431,80$	по результатам кондуктометрических измерений
М	для раствора KCl .
$R(\text{CH}_3\text{COOH}) =$	
750 Ом	
$\alpha(\text{CH}_3\text{COOH}) = ?$	

$$1) K_c = \alpha(\text{KCl}) \cdot R(\text{KCl}) = 0,277 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1} \cdot 431,8 \text{ Ом} = 119,608 \text{ м}^{-1}$$

$$2) \alpha(\text{CH}_3\text{COOH}) = \frac{K_c}{R(\text{CH}_3\text{COOH})} = \frac{119,608 \text{ м}^{-1}}{750 \text{ Ом}} = 0,159 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$$

Ответ: 0,159 См·м⁻¹

Задача 6. Рассчитайте молярную электрическую проводимость уксусной кислоты при бесконечном разбавлении при 298К, если известно, что предельные молярные проводимости растворов равны: $\lambda_m^0(\text{HCl}) = 426,1 \cdot 10^{-4} \text{ См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$; $\lambda_m^0(\text{NaCl}) = 126,4 \cdot 10^{-4} \text{ См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$; $\lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COONa}) = 91,0 \cdot 10^{-4} \text{ См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{моль}^{-1}$.

Дано

$$T = 298\text{K}$$

$$\lambda_m^0(\text{HCl}) = 426,1 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\lambda_m^0(\text{NaCl}) = 126,4 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COONa}) = 91,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COOH}) - ?$$

Решение

Используя закон Кольрауша о независимой подвижности ионов, можно записать равенство:

$$\lambda_m^0(\text{HCl}) + \lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COONa}) = \lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COOH}) + \lambda_m^0(\text{NaCl})$$

Отсюда:

$$\lambda_m^0 \text{CH}_3\text{COOH} = \lambda_m^0(\text{HCl}) + \lambda_m^0(\text{CH}_3\text{COONa}) -$$

$$\lambda_m^0(\text{NaCl}) = (426,1 + 91,0 - 126,4) \cdot 10^{-4} = 390,710^{-4}$$

$$\text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1} = 3,907 \cdot 10^{-2} \text{См} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$$

ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ РОЗЧИНІВ ТА БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
І ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Методичні вказівки
до виконання практичної роботи

Укладачі: В. О. Шигимага, Н. Г. Косуліна, Чорна М. О., Сухін В. В.,
Ляшенко Г. А., Коршунов К. С.

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 1,5

Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44