



УДК 54.08

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.16>

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА КОНСТАНТУ ДИСОЦІАЦІЇ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

**Р. П. Мигущенко<sup>1</sup>, М. М. Волобуєв<sup>2</sup>, І. В. Асєєва<sup>3</sup>,  
О. Ю. Кропачек<sup>4</sup>, В. М. Балєв<sup>5</sup>**

*Дана стаття присвячена метрологічному вивченню процесу дисоціації оцтової кислоти при зміні температури в діапазоні від 20 °С до 75 °С. У ході дослідження були розглянуті методи, проведена класифікація розглянутих методів, сформульована методика експериментів. Обрана методика відображає експрес визначення водневого показника за допомогою портативного рН-метра. Концентрація робочого розчину кислоти становила 6 моль/л, з якої готували розчин з концентрацією 1 моль/л. Для вимірювань були обрані вузлові температурні точки (чотири точки в діапазоні температур 20 °С – 75 °С; сформовано 5 дослідних проб оцтової кислоти (С(НАс) = 1 моль/л); проведено аналіз результатів вимірювань у вузлових точках на точність результатів вимірювань п'яти дослідних зразків оцтової кислоти за статистичними моментами першого та другого*

<sup>1</sup> доктор технічних наук, професор,  
проректор з науково-педагогічної роботи  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: mrp1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3287-9772

<sup>2</sup> кандидат хімічних наук, доцент,  
професор кафедри загальної неорганічної хімії  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: vmn2007@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9779-1176

<sup>3</sup> кандидат педагогічних наук,  
старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: aseevairina0@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9678-2681

<sup>4</sup> доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри теоретичних основ електротехніки  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: kropachek@ukr.net

ORCID: 0000-0001-5899-0252

<sup>5</sup> кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: bvnbn@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6803-4739

порядку; оцінено характеристики точності експериментальних даних. Температуру зразків оцтової кислоти доводили до вузлових точок з позитивним градієнтом температури за допомогою парової бані. Оцінка похибки вимірювання визначалася класом точності приладу і становила 0.32. За отриманими значеннями рН визначали константу дисоціації. Ці визначення проводили за умови забезпечення хімічної рівноваги. Характер поведінки константи дисоціації при зміні температури досліджуваних зразків явно нелінійний.

**Ключові слова:** оцтова кислота, температура, рН-метрія, константа дисоціації, титрування, концентрація.

## EFFECT OF TEMPERATURE ON THE DISSOCIATION COEFFICIENT OF ACETIC ACID

R. P. Mygushchenko, M. M. Volobuyev, I. V. Asieieva, O. Yu. Kropachek, V. M. Balev

This article is devoted to metrological study of acetic acid dissociation process at a temperature change in the range from 20 °C to 75 °C. The study considers methodology methods and presents their classification. The main experiments methodology is identified. The selected methods reflect the rapid determination of acidity using a portable pH meter. The concentration of working acid solution is 6 mol/l, from which a solution with a concentration of 1 mol/l is prepared. Nodal temperature points (four points in temperature range 20 °C – 75 °C) are chosen for measurements; 5 test samples of acetic acid are formed (C(HAc) = 1 mol/l); the analysis of measurements results at nodal points are carried out for the results accuracy on five experimental samples of acetic acid according to first and second order statistical moments; the characteristics of experimental data accuracy are evaluated. Acetic acid samples are brought to nodal points with a positive temperature gradient using a steam bath. The measurement error estimate is determined by the device accuracy class and is 0.32. The dissociation constant is determined from the obtained pH values. These determinations are carried out under condition of ensuring chemical equilibrium. The nature of dissociation constant temperature dependency is clearly non-linear.

**Key words:** acetic acid, temperature, pH metry, dissociation constant, titration, concentration.

### Вступ

Оцтова (етанова) кислота  $\text{CH}_3\text{COOH}$  – це безбарвна рідина з різким характерним запахом. Є однією з самих розповсюджених хімічних речовин на виробництві та у побуті. Використання цієї кислоти саме різноманітне. У хімічній промисловості з її застосуванням виробляють ацетон, пластичні маси, фарбники, штучне волокно і т.п. В харчовій промисловості оцтова кислота – це консервант, регулятор кислотності і харчова добавка. Солі оцтової кислоти застосовують як засоби для боротьби із шкідниками й хворобами рослин, стимуляторами росту, використовують для первинного протравлення при фарбуванні тканин. Оцтова кислота має широке застосування як розчинник (Ластов'як та ін., 2004).

У водному розчині оцтова кислота розпадається на катіон  $\text{H}^+$  і аніон  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ :  $\text{CH}_3\text{COOH} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$ , а константа дисоціації (Jankovic et al., 2010)  $K_a$  визначається як:

$$K_a = \frac{[\text{H}^+] \times [\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} \quad (1)$$

Деякі характеристики оцтової кислоти наведені у табл. 1.

Таблиця 1

### Характеристики оцтової кислоти

Характеристики	Показники
молекулярна маса	60.053 г/моль
зовнішній вигляд	прозора рідина
густина	1.0446 г/см <sup>3</sup>
температура плавлення	16.635 °C
температура кипіння	117.87 °C
розчинність	легко розчиняється у воді
pK <sub>a</sub>	4.756
діелектрична проникність	6.20

Одержання оцтової кислоти  $\text{CH}_3\text{COOH}$  здійснюється переважно методом ферментації, а для отримання чистої кислоти у великих масштабах застосовуються методи карбонілювання метанолу, окислення бутану і етанолу. Основним промисловим методом є одержання кислоти з метанолу.

Вплив температури на властивості оцтової кислоти на даний момент погано вивчений. Відомо лише, що при підвищенні температури оцтової кислоти до 110 °С гинуть оцтовокислі бактерії, сторонні мікроорганізми, а також виділяється їдка пара.

Дані дослідження присвячені кореляції константи дисоціації  $K_a$  (1) і температури навколишнього середовища.

### Матеріал і методи

Існує декілька методів визначення константи дисоціації  $K_a$  (Catherine & Housecroft, 2018). Розповсюджений метод ґрунтується на побудові кривої титрування як залежності  $pH$  розчину від об'єму титранту NaOH. У цьому методі, на кривій титрування визначається «стрибок», вимірюється координата «стрибка» по осі абсцис, координата «стрибка» поділяється на два і по цій координаті на кривій титрування визначається  $pH$  (Ghosh et al., 2022), як координата на осі ординат. Через отримане значення  $pH$  визначається константа дисоціації за формулою:

$$K_a = 10^{-pH}, \quad (1)$$

Для дослідження впливу температури на NaOH представлений метод не може бути застосований, оскільки:

- підігріта оцтова кислота об'ємом 1 мл дуже швидко охолоджується (тому зафіксувати температуру кислоти дуже важко);
- для фіксації температури на визначеному рівні необхідно підігрівати і розчин NaOH до такої ж температури (виконати цю процедуру неможливо, оскільки розчин NaOH знаходиться в бюретці);
- через малі об'єми рідин при титруванні (1 мл кислоти і 2–12 мл NaOH) неможливо скористатись рН-метром (для мінімізації похибки вимірювань зонд повинен бути повністю занурений у рідину);
- чутливість методу по визначенню  $pH$  є дуже низькою, що призводить до величезних похибок (згідно експериментальних даних).

Тому визначення впливу температури на  $K_a$  досліджувалось на основі побудови залежності  $pH$  розчину від температури (Xiong et al., 2021). Після отримання такої залежності  $K_a$  визначалася за формулою (1), яка трансформована у формулу 2:

$$K_a = \frac{10^{-2pH}}{C_0 - 10^{-pH}}, \quad (2)$$

де NaOH – початкова концентрація оцтової кислоти.

Формула (2) застосовується у точці еквівалентності при титруванні оцтової кислоти лугом NaOH. Так як початкова концентрація оцтової кислоти  $C_0$  не залежить від температури, то її доцільно визначати за допомогою титрування в звичайних лабораторних умовах при кімнатній температурі.

Таким чином, метою даних досліджень є визначення впливу температури на константу дисоціації оцтової кислоти. Для досягнення мети необхідно провести дві групи експериментів:

– визначення  $pH$  розчину оцтової кислоти об'ємом 60 мл у чотирьох вузлових точках – 20 °С, 35 °С, 50 °С, 75 °С за допомогою рН-метра;

– визначення початкової концентрації оцтової кислоти  $C_0$  методом титрування (Kumar, 2013).

Для експериментів по визначенню впливу температури на рН використовується: електрична піч, парова баня, рН-метр, термометр від 0 °С до 100 °С, два хімічних стакани об'ємом 200 мл, мірний стакан об'ємом 100 мл, хімічна піпетка, розчин оцтової кислоти концентрації  $\approx 1$  моль/л, дистильована вода (Пономарьова, 2022).

Для експериментів по визначенню початкової концентрації оцтової кислоти методом титрування необхідні: хімічна колба об'ємом 200 мл, мірний стакан об'ємом 50 мл, хімічна піпетка, бюретка об'ємом 50 мл, розчин оцтової кислоти концентрації  $\approx 1$  моль/л, дистильована вода, стандартизований розчин луку NaOH концентрації 0.1 моль/л, індикатор фенолфталеїн (Сухан та ін., 2022).

### Результати та обговорення

Результати визначення впливу температури на  $pH$  розчину наведені в табл. 2. (Wang et al., 2019). Результати визначення початкової концентрації  $C_0$  оцтової кислоти наведені в табл. 2.

Таблиця 2  
Значення  $pH$  розчину оцтової кислоти при різних температурах

Проба	$t_1$ (20 °С)	$t_2$ (35 °С)	$t_3$ (50 °С)	$t_4$ (75 °С)
1	2.1	2.1	1.8	1.6
2	2.0	1.8	1.7	1.3
3	2.1	1.9	1.8	1.1
4	2.0	1.9	1.7	1.1
5	2.1	1.8	1.5	1.0

В табл. 3 наведені показники об'єму оцтової кислоти  $V_{\kappa}$ , яка використовувалась в експериментах, концентрації  $C_{\lambda}$  та об'єму  $V_{\lambda}$  розчину NaOH. Вибір п'яти проб для експериментів дозволяє здійснювати вимірювання шляхом багатократних спостережень, а це, в свою чергу, підвищує точність результату (Іщенко, 2023).

Таблиця 3

Дані титрування

Проба	$V_{\kappa}$ , мл	$C_{\lambda}$ , моль/л	$V_{\lambda}$ , мл
1	1	0.1	10.1
2	1	0.1	10.0
3	1	0.1	10.2
4	1	0.1	9.8
5	1	0.1	9.9

За даними табл. 2 побудована графічна залежність  $pH$  розчину оцтової кислоти від температури  $pH = f(t)$  (рис. 1).

Відповідно до табл. 3, середні значення об'єму луку в експерименті  $V_{\lambda} = 10$  мл. Наявність даних табл. 2 дозволяє отримати середні значення (математичне сподівання  $M$ ) і розподіл даних відносно середніх значень (дисперсія  $D$ ) (Защепкіна та ін., 2021).

Середні значення і розподіл даних відносно середніх значень визначаються за формулами:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n pH_i}{n}, \quad (3)$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i - M)^2}{n-1}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість проб.

Математичне сподівання і дисперсія для даних табл. 2 представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Середні значення і розподіл даних

Дані	$t_1$ (20 °C)	$t_2$ (35 °C)	$t_3$ (50 °C)	$t_4$ (75 °C)
M	2.06	1.90	1.70	1.22
D	0.003	0.015	0.015	0.057

Одержані дані дозволяють оцінити загальну тенденцію зміни показників оцтової кислоти при зміні температури, оцінити лінійність характеристик, достовірність результатів при разовому вимірюванні за допомогою рН-метра (Garcia-Garcia et al., 2009). Здійснено розрахунок значень  $C_0$  за формулою (2) у вузлових точках (20 °C, 35 °C, 50 °C, 75 °C). Визначення  $C_0$  у відповідності до (2), здійснюється в умовах рівноваги в точці еквівалентності:

$$C_0 \cdot V_{\kappa} = C_{\lambda} \cdot V_{\lambda}, \quad (5)$$

де  $C_0$  – концентрація кислоти;

$V_{\kappa}$  – об'єм кислоти;

$C_{\lambda}$  – концентрація луку;

$V_{\lambda}$  – об'єм луку.

На основі формули (5) визначається значення початкової концентрації оцтової кислоти  $C_0$ :

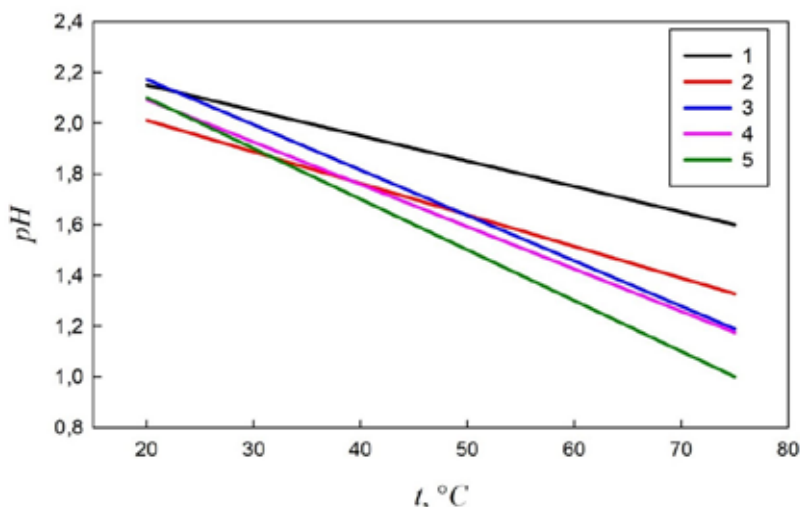


Рис. 1. Залежність  $pH = f(t)$  для досліджених зразків: 1 – проба 1; 2 – проба 2; 3 – проба 3; 4 – проба 4; 5 – проба 5

$$C_0 = \frac{C_l \cdot V_l}{V_k} \quad (6)$$

Значення  $C_0$  визначене на основі даних табл. 3 і формули (6) дорівнює  $C_0 = 1.0$  моль/л. Значення  $K_a$  у вузлових точках (20 °C, 35 °C, 50 °C, 75 °C), які визначені на основі формули (2), наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Значення  $K_a$  при різних температурах

t, °C	20	35	50	75
$C_0$	1.0	1.0	1.0	1.0
$K_a$	0.00007	0.00016	0.00041	0.00386

Проміжні значення для розрахунку даних табл. 5 наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Проміжні значення для розрахунку  $K_a$  при різних температурах

t, °C	20	35	50	75
$10^{-2pH}$	0.00007	0.00016	0.00040	0.00363
$10^{-pH}$	0.00812	0.01259	0.01995	0.06026
$C_0 - 10^{-2pH}$	0.99188	0.98741	0.98005	0.93974

На основі даних табл. 5, 6 побудована графічна залежність  $K_a = f(t)$  (рис. 2) значення константи дисоціації оцтової кислоти  $K_a$  (Amador et al., 2020) від температури розчину в діапазоні 20 °C – 75 °C.

Принциповим питанням експериментів і подальшої верифікації отриманих даних є аналіз похибок вимірювання (Тичков та ін., 2021). Розрахунок похибки початкової концентрації оцтової кислоти  $C_0$ , виходячи з (7), визначаються за формулою

$$\Delta C_0^2 = \left( \frac{dC_0}{dC_l} \cdot \Delta C_l \right)^2 + \left( \frac{dC_0}{dV_l} \cdot \Delta V_l \right)^2 + \left( \frac{dC_0}{dV_k} \cdot \Delta V_k \right)^2 \quad (7)$$

$\Delta C_l$  – відповідає похибці стандартизованого NaOH і дорівнює 0.01 моль/л;

$\Delta V_l$  – відповідає класу точності бюретки і дорівнює 0.1 мл;

$\Delta V_k$  – відповідає класу точності хімічної піпетки і дорівнює 0.3 мл;

$\frac{dC_0}{dC_l}$ ,  $\frac{dC_0}{dV_l}$ ,  $\frac{dC_0}{dV_k}$  – вагові коефіцієнти.

При переході від похідних до прирощень, а також при визначенні виразів для конкретних вагових коефіцієнтів (Mugushchenko et al., 2023), формула (7) перетворюється в формулу для визначення похибки вимірювання  $C_0$ :

$$\Delta C_0 = \sqrt{\left( \frac{V_l}{V_k} \Delta C_l \right)^2 + \left( \frac{C_l}{V_k} \Delta V_l \right)^2 + \left( \frac{C_l V_l}{V_k^2} \Delta V_k \right)^2} \quad (8)$$

Підставляючи в (8) значення похибки стандартизації, бюретки, хімічної піпетки, а також даних  $C_l$ ,  $V_l$ ,  $V_k$  (табл. 3 і формула (3)), розрахована похибка становить  $\Delta C_0 = 0.3$  моль/л:

$$\Delta C_0 = \sqrt{\left( \frac{10}{1} \cdot 0.01 \right)^2 + \left( \frac{0.1}{1} \cdot 0.1 \right)^2 + \left( \frac{0.1 \cdot 10}{1^2} \cdot 0.3 \right)^2}$$

Оцінка похибки визначення  $K_a$  у вузлових температурних точках здійснена за формулою (2). Похибка  $K_a$ , відповідно до формули (2), залежить від класу точності рН-метра ( $\Delta_{pH} = 0.1$ ) і похибки визначення початкової концентрації оцтової кислоти  $C_0$  ( $\Delta C_0 = 0.3$  моль/л).

Для оцінки похибки  $\Delta K_a$  доцільно використовувати формулу:

$$\Delta K_a = \sqrt{\Delta_{pH}^2 + \Delta C_0^2} \quad (9)$$

Відповідно до (9),  $\Delta K_a = 0.32$ .

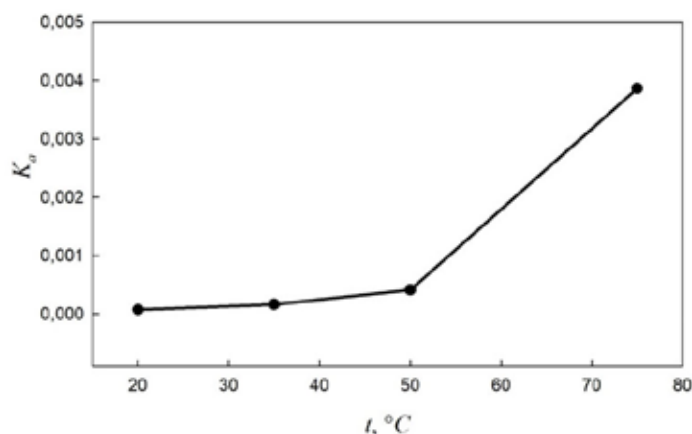


Рис. 2. Залежність  $K_a = f(t)$

## Висновки

1. Проведені дослідження впливу температури на коефіцієнт дисоціації  $K_a$  оцтової кислоти у ході двох груп експериментів. Перша група з використанням експрес-метода вимірювання  $pH$  оцтової кислоти за допомогою портативного  $pH$ -метра дозволила оцінити вплив температури на  $pH$  розчину кислоти. На основі залежності константи дисоціації  $K_a$  від температури здійснено розрахунок  $K_a$  враховуючи значення  $pH$  при відомій початковій концентрації оцтової кислоти  $C_0$  за умови рівноваги.

2. З метою визначення початкової концентрації оцтової кислоти  $C_0$ , проведена друга група експериментів за допомогою титриметричного аналізу. Реалізація методу титрування на практиці використовує базове лінійне рівняння (6) з трьома параметрами. Два параметри з трьох ( $V_k$ ,

$V_n$ ) визначаються відповідними вимірюваннями об'єму, третій ( $C_n$ ) – використовує стандартизований луг  $NaOH$ . Використання даного методу спирається на формули (2) і (7), а значить, здійснюється реалізація непрямих вимірювань, що впливає на точність, оскільки виконується додавання (арифметичне, алгебраїчне, геометричне) похибок окремих складових формули. Нелінійний характер залежності  $K_a f(t)$  легко виправляється внесенням коректувальних схем (двохполюсників, чотирьохполюсників) в електронну систему  $pH$ -метра. Таким чином можлива температурна корекція пристрою вимірювання.

3. Дисоціація оцтової кислоти зростає зі збільшенням температури. Залежність константи дисоціації  $K_a$  оцтової кислоти від температур має нелінійний характер, що може бути описано експоненційною залежністю.

## Список використаної літератури

- Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем : навч. посіб. Київ : Вид-во КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.
- Іщенко М.В. Забезпечення і контроль якості аналізу : навч. посіб. Київ, 2023. 73 с.
- Ластов'як Я.В. Караман Н.С., Полутаренко М.С., Паздерський Ю.А. Оцтова кислота. Властивості, використання, виробництво : монографія. Львів : Вид-во НУ «Львів Політехніка», 2004. 166 с.
- Пономарьова В.В. Основи хімії: навчальний посібник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 160 с.
- Сухан В.В., Трохименко О.М., Трохименко А.Ю. Аналітичні реагенти й техніка приготування їхніх розчинів: підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. 592 с.
- Тичков В.В., Гальченко В.Я., Трємбовецька Р.В. Метрологічне забезпечення фізико-хімічних вимірювань: навч.-метод. посіб. Черкаси, 2021. 253 с.
- Amador C., Wencheng F. Liu, Mina C. Johnson-Glenberg, Likamwa R. Work-in-Progress – Titration Experiment: Virtual Reality Chemistry Lab with Haptic Burette. *Proceedings of 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network*. 2020. P. 363–365.
- Catherine E., Housecroft, Alan G. Sharpe. *Inorganic Chemistry (5-th ed.)*. Pearson Education Limited. 2018. 1296 p.
- García-García S., Wold S., Jonsson M. Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. *Appl. Clay Sci.* 2009. Vol. 43 (1). P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.07.011>.
- Ghosh D., Chakraborty K., Bharti B., Pulimi M., Anand S., Chandrasekaran N., Kumar Rai P., Swapna Singha Rabha C., Mukherjee A. The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. Vol. 647. P. 129025. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129025>.
- Jankovic M., Sinadinovic-Fisher S., Lamshoef M. Liquid-Liquid Equilibrium Constant for Acetic Acid in an Epoxidized Soybean Oil-Acetic Acid-Water System. *Journal of JAOCS*. 2010. Vol. 87 (5). P. 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1531-z>.
- Kumar A., Galal M. Zaiad. Spectrophotometric determination of dissociation quotients of triazene –  $N^1$  – oxides and the effect of substituents on pKa values. *Sci. Res. J.* 2013. Vol. I (IV). P. 56–59.
- Mygushchenko R., Kropachek O., Suchkov H., Korzhov I., Asieieva I., Mygushchenko K. Algorithmic support of the automatic identification device for industrial units nodes, 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. P. 186–193. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023>.

Wang Y., Yang K., Chefetz B., Xing B., Lin, D. Te pH and concentration dependent interfacial interaction and heteroaggregation between nanoparticulate zero-valent iron and clay mineral particles. *Environ. Sci. Nano*. 2019. Vol.7. P. 2129–2140. <https://doi.org/10.1039/C9EN00433E>.

Xiong Y., Liu X., Xiong H. Aggregation modeling of the influence of pH on the aggregation of variably charged nanoparticles. *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. P. 17386. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96798-3>.

### References (translated & transliterated)

Zashchepkina, N.M., Shulha, O.V., & Nakonechnyi, O.A. (2021). Metrolohichne zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system: navch. posib. [Metrological support of information and measurement systems: training. manual]. Kyiv : Vyd-vo KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].

Ishchenko, M.V. (2023). Zabezpechennia i kontrol yakosti analizu: navch. posib. [Ensuring and controlling the quality of analysis: teacher manual]. Kyiv [in Ukrainian].

Lastoviak, Ya.V., Karaman, N.S., Polutarenko, M.S., & Pazderskyi, Yu.A. (2004). Otvstova kyslota. Vlastyvosti, vykorystannia, vyrobnytstvo: monohrafiia [Acetic acid. Properties, use, production: monograph]. Lviv: Vydavnytvo Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian].

Ponomarova, V.V. (2022). Osnovy khimii: navchalnyi posibnyk [The basics of chemistry: a study guide]. Kyiv : Publishiing center “Kyiv university” [in Ukrainian].

Sukhan, V.V., Trokhymenko, O.M., & Trokhymenko, A.Yu. (2022). Analitychni reahenty y tekhnika pryhotuvannia yikhnykh rozchyniv: pidruchnyk [Analytical reagents and the technique of preparing their solutions: a textbook]. Kyiv: Publishiing center “Kyiv university” [in Ukrainian].

Tychkov, V.V., Halchenko, V.Ya., & Trembovetska, R.V. (2021). Metrolohichne zabezpechennia fizyko-khimichnykh vymiriuvan: navch.-metod. posib. [Metrological support of physical and chemical measurements: educat. and method. manual]. Cherkasy [in Ukrainian].

Amador, C., Wencheng, F. Liu, Mina, C. Johnson-Glenberg, & Likamwa, R. (2020). Work-in-Progress – Titration Experiment: Virtual Reality Chemistry Lab with Haptic Burette. *Proceedings of 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network*, 363–365 [in English].

Catherine, E., Housecroft, & Alan, G. Sharpe (2018). Inorganic Chemistry (5-th ed.). *Pearson Education Limited*, 1296 [in English].

García-García, S., Wold, S., & Jonsson, M. (2009). Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at diferent pH and ionic strength. *Appl. Clay Sci.*, 43 (1), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.07.011> [in English].

Ghosh, D., Chakraborty, K., Bharti, Pulimi, M., Anand, S., Chandrasekaran N., Kumar Rai, P., Swapna Singha, Rabha, & A. Mukherjee (2022). The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 647, 129025. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129025> [in English].

Jankovic, M., Sinadinovic-Fisher, S., & Lamshoef, M. (2010). Liquid-Liquid Equilibrium Constant for Acetic Acid in an Epoxidized Soybean Oil-Acetic Acid-Water System. *Journal of JAOCS*, 87 (5), 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1531-z> [in English].

Kumar, A., & Galal M, Zaiad (2013). Spectrophotometric determination of dissociation quotients of triazene – N<sup>1</sup> – oxides and the effect of substituents on pKa values. *Sci. Res. J.*, I (IV), 56–59 [in English].

Mygushchenko, R., Kropachek, O., Suchkov, H., Korzhov, I., Asieieva, I., & Mygushchenko, K. (2023). Algorithmic support of the automatic identification device for industrial units nodes, *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 186–193. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023> [in English].

Wang, Y., Yang, K., Chefetz, B., Xing, B., & Lin, D. (2019). The pH and concentration dependent interfacial interaction and heteroaggregation between nanoparticulate zero-valent iron and clay mineral particles. *Environ. Sci. Nano*, 7, 2129–2140. <https://doi.org/10.1039/C9EN00433E> [in English].

Xiong, Y., Liu, X., & Xiong, H. (2021). Aggregation modeling of the influence of pH on the aggregation of variably charged nanoparticles. *Sci. Rep.*, 11, 17386. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96798-3> [in English].

Отримано: 05.04.2024

Прийнято: 17.04.2024