

Л.А. БУЛАВІН,<sup>1</sup> М.П. МАЛОМУЖ,<sup>2</sup> О.В. ХОРОЛЬСЬКИЙ<sup>3</sup><sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет  
(Вул. Володимирська, 64/13, Київ 01601)<sup>2</sup> Одеський національний університет імені І.І. Мечникова  
(Вул. Дворянська, 2, Одеса 65026)<sup>3</sup> Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г. Короленка  
(Вул. Остроградського, 2, Полтава 36000; e-mail: khorolskiy.alexey@gmail.com)**ЗВІДНА ТА НЕЗВІДНА ЧАСТИНИ  
ВОДНЕВОГО ПОКАЗНИКА рН РОЗБАВЛЕНИХ  
ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ**УДК 532.13, 577.322.3,  
577.356

Основна увага в статті приділяється означенню звідної та незвідної складових водневого показника рН та визначенню їх температурних і концентраційних залежностей у водно-солевих розчинах. Показано, що в розбавлених водних розчинах хлориду натрію температурна залежність звідної складової рН має лінійний характер, що відрізняється від аналогічної залежності у воді тільки нахилом ліній температурної залежності рН, який зростає зі зростанням концентрації солі. Незвідна складова рН є немонотонною за температурою і приймає мінімальне значення за оптимальної температури життєдіяльності людини і ссавців (36,6 °C). Встановлено існування характерної концентрації солі, яка поділяє сімейство температурних залежностей рН на дві підсистеми з різними характерами залежності від температури.

*Ключові слова:* водний розчин, хлорид натрію, водневий показник, звідна частина, незвідна частина.

**1. Вступ**

Роль водневого показника (рН) в життєдіяльності людини і ссавців вже давно відома [1, 2]. Проте більшість питань, які б відповідали на питання: внаслідок чого це відбувається, залишається відкритим. У нещодавній роботі авторів [3] ставиться і розв'язується питання про тісний зв'язок меж області життєдіяльності людини і багатьох ссавців зі значеннями рН. В [4] доведено, що за температур і значень рН з області життєдіяльності час релаксації  $\tau(\text{pH}, T)$  нерівноважних значень рН приймає найменші значення, тобто швидкість протікання біофізичних процесів суттєво перевищує швидкість їх протікання в будь-якій іншій області. Точка  $(\text{pH}_0, T_0)$ , в якій  $\tau(\text{pH}, T)$  приймає найменше значення, ідентифікується з оптимальною температурою життєдіяльності людини і ссавців.

Цитування: Булавін Л.А., Маломуж М.П., Хорольський О.В. Звідна та незвідна частини водневого показника рН розбавлених водних розчинів хлориду натрію. *Укр. фіз. журн.* **68**, № 3, 177 (2023).

Citation: Bulavin L.A., Malomuzh N.P., Khorolskiy O.V. Reducible and irreducible components of the pH value in dilute aqueous solutions of sodium chloride. *Ukr. J. Phys.* **68**, No. 3, 177 (2023). <https://doi.org/10.15407/ujpe68.3.177>.

ISSN 0372-400X. *Укр. фіз. журн.* 2023. Т. 68, № 3

На основі наведених міркувань встановлено, що  $T_o = 36,6$  °C,  $T_l = (30 \pm 2)$  °C і  $T_u = 42$  °C, де індекси “o”, “l” і “u” позначають значення величин в точці оптимуму часу релаксації рН, а також крайні ліву і праву точки інтервалу життєдіяльності. Значення рН в оптимальній точці є дещо меншими від експериментальних, але це і очікувалось, оскільки вплив макромолекул типу альбуміну на значення рН не враховувався.

У даній роботі ми продовжимо дослідження водневого показника рН. Більш конкретно, ми означимо звідну і незвідну складові водневого показника і дослідимо їх залежність від температури та концентрації солі у водних розчинах хлориду натрію. Основна увага зосереджується на концентраціях солі, близьких до тих, що властиві плазмі крові людини. Буде доведено, що температурна залежність незвідної складової рН характеризується точкою, в околі якої вона приймає локально-мінімальне значення і яка співпадає з оптимальною температурою життєдіяльності людини.

**2. Експериментальна частина**

У дослідженні використана свіжевигодована дистильована вода класу чистоти II згідно з ДСТУ

ISO 3696:2003, отримана за допомогою системи очистки води Adrona Crystal EX Double Flow (Adrona SIA, Латвія). Як вихідний розчин використано 0,9 мас.% водний розчин хлориду натрію для інфузій фармацевтичної якості (Дарниця, Україна).

Експериментальні вимірювання водневого показника проведені в інтервалі температур (294–323) К для розчинів хлориду натрію, концентрації яких задаються числами  $\zeta = (180–1620)$ , які відповідають числу молекул води на один іон солі, ці концентрації відповідають  $\omega = (0,9–0,1)$  мас.%. Неважко бачити, що  $\zeta$  і концентрація  $\omega$  пов'язані між собою співвідношенням:  $\zeta = (1 - \omega)/\omega$ . Розчини готували гравіметрично з використанням терезів Radwag AS 220.R2 (Radwag, Польща), сумарна відносна похибка вимірювання маси не перевищувала 0,05%. Термостатування забезпечувалось ультра термостатом UTU-10 (Krakow, Польща) з похибкою  $\pm 0,1$  К.

Водневий показник вимірювали відповідно до рекомендацій IUPAC [5, 6] за допомогою приладу AZ Bench Top Water Quality Meter 86505 (AZ Instrument Corp., Тайвань) з температурно-чутливим щупом. Сумарна відносна похибка вимірювання рН становила 0,5% [7, 8]. Перед вимірюваннями рН-метр калібрували за допомогою еталонних буферних розчинів з рН 4,00 і рН 7,00 за температури 298 К.

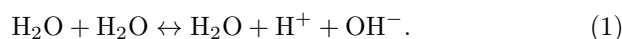
Розчинам забезпечувались однакові умови термостатування і вимірювання. Особливості методики вимірювання рН розчинів хлориду натрію при їх контакті з атмосферним вуглекислим газом докладно описано в [3, 4].

У роботі [7] показано, що абсолютна похибка вимірювання водневого показника за допомогою рН-метра з двоточковим калібруванням, з автоматичною компенсацією температури та комбінованим скляним електродом не може бути кращою за  $\pm 0,02$  одиниць рН. Основною проблемою обчислення невизначеності інструментальних вимірювань рН називають залишковий потенціал рідкого переходу (residual liquid junction potential), а також такі причини: потенціали асиметрії, ефекти змішування, ефекти пам'яті, температурні ефекти (наприклад, градієнти температури над електродом), засмічення діафрагми, електричний шум (екранування кабелів), перехресне забруднення, карбонатний обмін (у лужних калібрувальних буферах) [7,

8]. У роботі [9] показано, що врахування усіх вищезазначених факторів невизначеності для вимірювання водневого показника у воді та розбавлених водних розчинах в інтервалі значень рН (3,5–7,5) призводить до значення абсолютної похибки вимірювань  $\pm(0,10–0,14)$  одиниць рН. У роботі [10] показано, що значний вплив на визначення рН розчину за допомогою інструментальних вимірювань є чистота використаних реагентів та знання точної концентрації розчинів.

### 3. Звідні та незвідні внески до водневого показника (рН) водних розчинів хлориду натрію

У загальному випадку значення рН зумовлені з одного боку – температурними ефектами, з другого – присутністю солі. Тепловий рух молекул підпорядковується розподілу Максвелла, що гарантує існування таких бінарних зіткнень, які здатні зруйнувати цілісність принаймні однієї з молекул і вивільненню катіона  $H^+$ :



Зазначимо, що механізм бінарних зіткнень молекул води, як показано в роботі [4], призводить до такого внеску у водневий показник:

$$pH = -\lg(c_H^+), \quad (2)$$

де

$$c_H^+ = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{3T_D}{2T}} \exp\left(-\frac{3T_D}{2T}\right) \quad (3)$$

концентрація катіонів гідрогену,  $T_D$  – ефективна температура дисоціації молекул води, які знаходяться у водному середовищі. Неважко переконались, що:

$$pH(T) = pH(T_{tr}) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{T_{tr}}{T}\right) - \frac{3T_D}{2T_{tr}} \left(1 - \frac{T_{tr}}{T}\right) \lg e, \quad (4)$$

де

$$pH(T_{tr}) = -\lg\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{3T_D}{2T_{tr}}\right) + \frac{3T_D}{2T_{tr}} \lg e. \quad (5)$$

Як бачимо з рис. 1, розраховані за формулою (4) при фіксованій температурі дисоціації  $T_D = 2400$  К значення рН води в межах похибки вимірювань цілком задовільно корелюють з експериментальними даними в інтервалі температур

(273–333) К. Для погодження розрахункових і експериментальних значень рН води в усьому температурному інтервалі існування рідкої фази потрібно ввести слабку температурну залежність величини  $T_D$ , що знаходить природне пояснення в рамках підходу [4].

При додаванні солей у воду, молекули останніх дисоціюють і навколо них утворюються гідратні оболонки [12, 13]. Як наслідок, 1) значні електричні поля катіонів і аніонів призводять до зниження порога дисоціації  $T_D(\zeta)$  в моделі бінарних зіткнень [4], а також до 2) додаткового механізму дисоціації, викликаного суттєвими флуктуаціями напруженості електричних полів всередині миттєвої гідратної оболонки.

У згоді з цим, в першому випадку температурна залежність відповідного внеску у водневий показник буде такою ж прямолінійною за температурою:

$$pH_{\text{red}}(T, \zeta) = pH(T_*(\zeta), \zeta) + A(\zeta)(T - T_*(\zeta)) \dots, \quad (6)$$

як і в воді:

$$pH_w(T) = pH_w(T_*) + A_w(T - T_*) + \dots \quad (7)$$

Тут  $T_*(\zeta)$  – калібрувальна точка, типу  $T_w = T_*(\zeta \rightarrow \infty) = 25^\circ\text{C}$  для води. Зв'язна складова водневого показника повинна задовольняти такі властивості:

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} pH_{\text{red}}(T, \zeta) = pH_w(T), \quad (8)$$

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} A(\zeta) = A_w, \quad (9)$$

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} T_*(\zeta) = T_w. \quad (10)$$

Внески другого типу в рН будуть відрізнятися від внесків першого типу їх характером залежності від концентрації. Так, при  $\zeta \rightarrow \infty$ :

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} pH_{\text{irr}}(T, \zeta) = 0. \quad (11)$$

З (11) випливає, що за відносно малих концентрацій солі

$$pH_{\text{irr}}(T, \zeta) \approx \zeta_1/\zeta + \dots \quad (12)$$

Концентраційну залежність  $pH_{\text{irr}}(T, \zeta)$  будемо обчислювати за формулою:

$$pH_{\text{irr}}(T, \zeta) = pH(T, \zeta) - pH(T, \zeta_0), \quad (13)$$

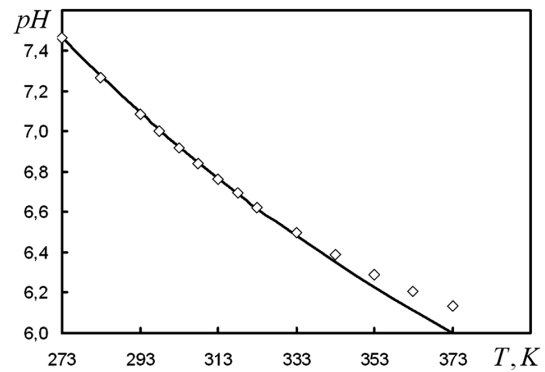


Рис. 1. Температурна залежність водневого показника для води: ромбики позначають експериментальні значення з [11], суцільна крива побудована за формулою (4) при значенні  $T_D = 2400$  К

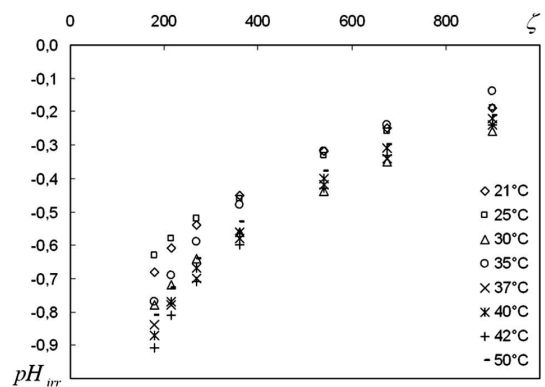


Рис. 2. Концентраційні залежності незв'язної частини  $pH_{\text{irr}}(T, \zeta)$  водних розчинів хлориду натрію за відповідних температур

де  $pH(T, \zeta)$  – експериментальні значення водневого показника, отримані в роботах [3, 4],  $\zeta$  – число молекул води, що припадає на один іон солі NaCl. Вважається, що за  $\zeta_0 = 1620$  водневі показники розчину солі та води практично співпадають один з одним. Поведінка  $pH_{\text{irr}}(T, \zeta)$  в залежності від концентрації наведена на рис. 2.

Приймаючи, що у загальному вигляді  $pH(T, \zeta)$  є суперпозицією:

$$pH(T, \zeta) = pH_{\text{red}}(T, \zeta) + pH_{\text{irr}}(T, \zeta) \quad (14)$$

для концентраційної залежності  $pH_{\text{red}}(T, \zeta)$  за тих самих температур, ми отримуємо (рис. 3):

$$pH_{\text{red}}(T, \zeta) = pH(T, \zeta) - pH_{\text{irr}}(T, \zeta). \quad (15)$$

У багатьох відношеннях більш інформативними виявляються температурні залежності  $pH_{\text{red}}(T, \zeta)$

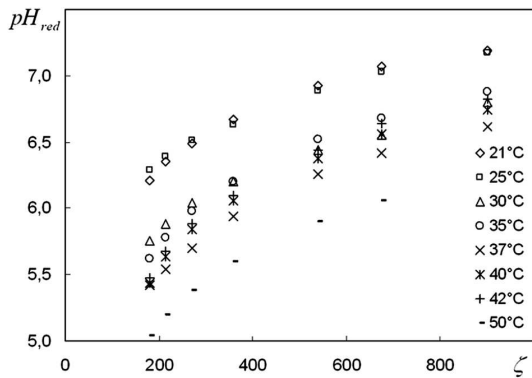


Рис. 3. Концентраційні залежності звідної частини  $pH_{red}(T, \zeta)$  водних розчинів хлориду натрію за відповідних температур

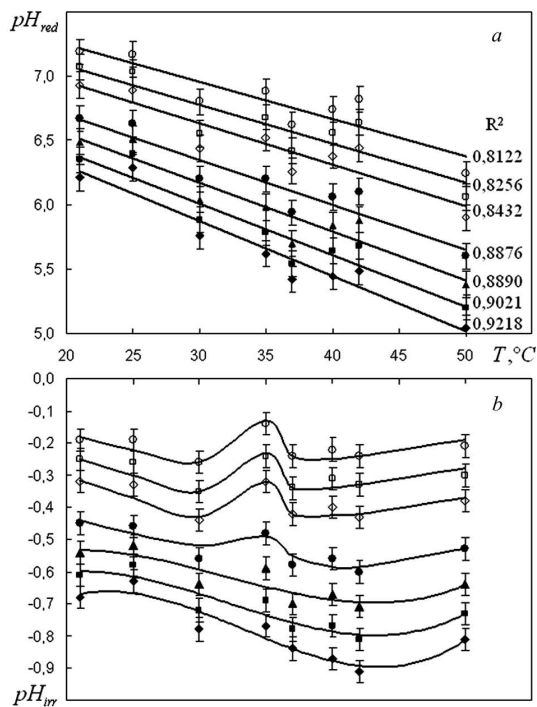


Рис. 4. Температурні залежності  $pH_{red}(T, \zeta)$  (a) і  $pH_{irr}(T, \zeta)$  (b) водних розчинів NaCl за фіксованих концентрацій солі:  $\zeta = 180$  (◆), 215 (■), 270 (▲), 360 (●), 540 (◇), 675 (□), 900 (○). Коефіцієнти детермінації  $R^2$  апроксимацій  $pH_{red}(T, \zeta)$  лінійними залежностями вказані на рисунку (a)

і  $pH_{irr}(T, \zeta)$  водних розчинів NaCl за фіксованих значень концентрації (рис. 4).

Як бачимо, характер температурної залежності  $pH_{red}(T, \zeta)$  є близьким до лінійного, як це спостерігається на рис. 1. Це підтверджує наше очі-

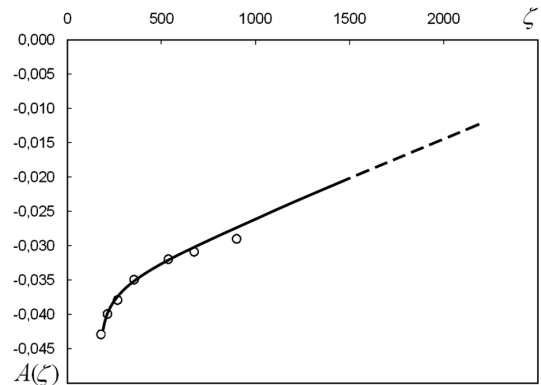


Рис. 5. Концентраційна залежність  $A(\zeta)$  для водних розчинів хлориду натрію

кування, що  $pH_{red}(T, \zeta)$  викликається бінарними зіткненнями, але з нижчою температурою дисоціації. Інший характер температурної залежності  $pH_{irr}(T, \zeta)$  свідчить про більш глибокий зв'язок незвідної складової з особливостями поведінки живих організмів.

Додатково проілюструємо смисл поділу фізичної величини на звідну та незвідну частини на прикладі поляризованості молекули азоту  $N_2$ . Нерідко поляризованість  $\alpha_{N_2}$  молекули азоту апроксимується виразом:

$$\alpha_{N_2} \approx \alpha_N + \alpha_N. \quad (16)$$

Наближення (16) стає точним, якщо ми додамо внесок  $\delta\alpha(r_{12})$ , який виникає внаслідок взаємодії між атомами нітрогену і залежить від відстані  $r_{12}$  між ними:

$$\alpha_{N_2} = \alpha_N + \alpha_N + \delta\alpha(r_{12}), \quad (17)$$

де при  $r_{12} \rightarrow \infty$  доданок  $\delta\alpha(r_{12}) \rightarrow 0$ . У зв'язку з цим прийнято називати  $\alpha'_{N_2} = 2\alpha_N$  звідною частиною поляризованості  $\alpha_{N_2}$ , а додатковий внесок  $\delta\alpha(r_{12}) \rightarrow 0$ , коли  $r_{12} \rightarrow \infty$ , прямо інтерпретувати як незвідну частину  $\alpha_{N_2}$ .

#### 4. Важливі особливості температурної залежності $pH_{red}(T, \zeta)$ і $pH_{irr}(T, \zeta)$ водних розчинів NaCl

У цьому розділі ми зосередимо основну увагу на:

1) температурній залежності тангенса нахилу прямих, які апроксимують поведінку  $pH_{red}(T, \zeta)$  за різних значень концентрації;

2) концентраційну залежність точок калібровки;  
3) зв'язок температурної залежності  $pH_{irr}(T, \zeta)$  з фізіологічними особливостями життєдіяльності людини і ссавців.

Концентраційна залежність коефіцієнта  $A(\zeta) = d(pH_{red})/dT$ , який визначає ступінь нахилу прямих  $pH_{red}(T, \zeta)$  і визначений за експериментальними даними з рис. 4, наведена на рис. 5. Зауважимо: додатково вважається, що температурна залежність тангенса нахилу  $A(\zeta)$  повинна змінюватись більш суттєво, ніж калібрувальна температура.

З аналізу рис. 4, а випливає, що значення коефіцієнта детермінації  $R^2$  при апроксимації  $pH_{red}(T, \zeta)$  лінійними залежностями зменшується із зростанням  $\zeta$ .

Порівняння чисельних значень  $A(\zeta)$  за кількох значень  $\zeta$  зі значенням для води  $A_w = A(\zeta \rightarrow \infty)$  представлено в таблиці та на рис. 5. Як бачимо, гранична умова (9) у вигляді  $\lim_{\zeta \rightarrow \infty} A(\zeta) = A_w$  задовольняється, але наближення до граничного значення відбувається повільно.

З аналізу рис. 4 випливає, що і гранична умова (11) у вигляді  $\lim_{\zeta \rightarrow \infty} pH_{irr}(T, \zeta) = 0$  теж задовільно виконується. Неважко переконатись, що усереднені за температурою значення  $pH_{irr}(T, \zeta)$  з рис. 4 для кожної дослідженої концентрації задовольняють рівняння:

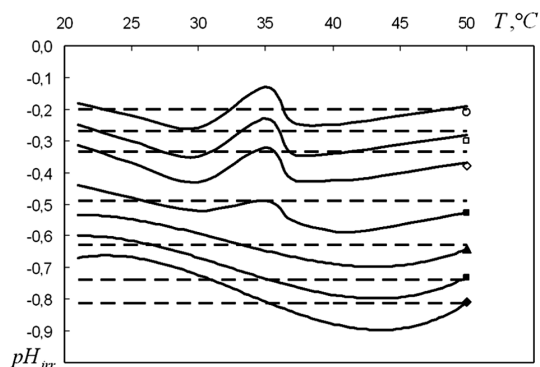
$$pH_{irr}(T, \zeta) \approx \zeta_1/\zeta + \zeta_2/\zeta^2 + \dots, \quad (18)$$

як це повинно бути у відповідності з (12), причому тут  $\zeta_1 \approx 178$  і  $\zeta_2 \approx 4417$  (рис. 6).

Разом з тим, більш важливою є інша обставина – криві  $pH_{irr}(T, \zeta)$  розділяються на два підсімейства: 1)  $180 < \zeta < \zeta_*$ ,  $\zeta_* \approx 300$  і 2)  $\zeta_* < \zeta < 900$  з різною структурою кривих. Мінімальні значення кривих

**Концентраційні залежності коефіцієнта нахилу прямих  $pH_{red}(T, \zeta)$  водних розчинів хлориду натрію**

$\zeta$	$A(\zeta)$
$\infty$	-0.013
900	-0.029
675	-0.031
540	-0.032
360	-0.035
270	-0.038
215	-0.040
180	-0.043



**Рис. 6.** Температурні залежності  $pH_{irr}(T, \zeta)$  водних розчинів NaCl за фіксованих концентрацій солі:  $\zeta = 180$  (◆), 215 (■), 270 (▲), 360 (●), 540 (◇), 675 (□), 900 (○). Суцільні лінії відповідають кривим на рис. 4, b, пунктиром вказані лінійні залежності, побудовані згідно з рівнянням (18)

$pH_{irr}(T, \zeta)$  з першого сімейства спостерігаються саме в околі температури  $T_u \approx 42$  °C, яка згідно з [3], має смисл верхньої межі для температурного інтервалу життєдіяльності людини і ссавців.

При цьому мінімальні значення  $pH_{irr}(T, \zeta)$  для кривих з другого сімейства спостерігаються в точках:  $T_l^{\min} \approx 30$  °C і  $T_o^{\min} \approx 37$  °C, які відповідають нижній межі інтервалу життєдіяльності і оптимальній температурі життєдіяльності людини і ссавців [14–24].

## 5. Висновки

Водневий показник рН розбавлених водних розчинів хлориду натрію є суперпозицією зв'язної та незв'язної складових. Зв'язна складова лінійно залежить від температури і тому не може визначати характерні деталі життєдіяльності людини і ссавців. Основні параметри області життєдіяльності людини і ссавців мають характеризуватися незв'язною складовою рН, яка на порядок менша від зв'язної складової рН.

Точки мінімумів на кривих незв'язної частини рН водних розчинів хлориду натрію безпосередньо пов'язані з температурами, які можна інтерпретувати як нижню ( $T_l \approx 30$  °C) і верхню ( $T_u \approx 42$  °C) границі температурного інтервалу життєдіяльності людини і ссавців. Разом з тим, температура мінімуму в околі  $T_o \approx 37$  °C може бути інтерпретована як оптимальна температура їх життєдіяльності.

Пропорційність незв'язної частини рН до концентрації хлориду натрію може свідчити про те, що

незначні зміни рН пов'язані з відповідними змінами сольового складу плазми крові, які впливають на стан організму людини.

У зв'язку з різною поведінкою звідної та незвідної складових рН особливого значення набуває питання про зміну конформації альбуміну [25] та інших протеїнів в залежності від значення водневого показника. Додавання протеїнів призводитиме до зміни, перш за все, звідної складової водневого показника, а зміна конформації альбуміну буде зумовлена, насамперед, електричними полями катіонів гідрогенів, які – в свою чергу – безпосередньо впливатимуть і на незвідну складову водневого показника.

*Наприкінці статті ми хотіли б сердечно подякувати нашому колезі з Канади доктору Анатолію Фісенко за стимулювання і підтримку наших досліджень фізичної природи водневого показника у плазмі крові людини і савців.*

- D.U. Silverthorn. *Human Physiology: An Integrated Approach*, 8 Eds. (Pearson, 2018) [ISBN: 978-0134605197].
- J.E. Hall, M.E. Hall. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*, 14 Eds. (Elsevier, 2020) [ISBN: 978-0323597128].
- L.A. Bulavin, N.P. Malomuzh, O.V. Khorolskyi. Temperature and concentration dependences of pH in aqueous NaCl solutions with dissolved atmospheric CO<sub>2</sub>. *Ukr. J. Phys.* **67** (12), 833 (2022).
- O.D. Stoliaryk, O.V. Khorolskyi. Influence of atmospheric carbon dioxide on the acid-base balance in aqueous sodium chloride solutions. *Ukr. J. Phys.* **67** (7), 515 (2022).
- R.G. Bates. *Determination of pH: Theory and Practice* (John Wiley and Sons, 1964) [ISBN: 9780471056461].
- R.P. Buck, S. Rondinini, A.K. Covington, F.G.K. Baucke, C.M.A. Brett, M.F. Camoes, M.J.T. Milton, T. Mussini, R. Naumann, K.W. Pratt, P. Spitzer, G.S. Wilson. Measurement of pH. Definition, standards, and procedures (IUPAC Recommendations 2002). *Pure and Appl. Chem.* **74** (11), 2169 (2002).
- I. Leito, L. Strauss, E. Koort, V. Pihl. Estimation of uncertainty in routine pH measurement. *Accreditation and Quality Assurance* **7** (6), 242 (2002).
- G. Meinrath, P. Spitzer. Uncertainties in determination of pH. *Mikrochimica Acta* **135** (3–4), 155 (2000).
- R. Kadis, I. Leito. Evaluation of the residual liquid junction potential contribution to the uncertainty in pH measurement: A case study on low ionic strength natural waters. *Analytica Chimica Acta* **664** (2), 129 (2010).
- V. Souza, A. Pires Ordine, I.C.S. Fraga, M.A. Getrouw, P.P. Borges, J.C. Damasceno, P.R.G. Couto. Effect of NaCl and HCl concentrations on primary pH measurement for the certification of standard materials. *Braz. Arch. Biol. Technol.* **49** (Special), 79 (2006).
- T.S. Light, S.L. Licht. Conductivity and resistivity of water from the melting to critical point. *Anal. Chem.* **59**, 2327 (1987).
- M. Yizhak. *Ions in Water and Biophysical Implications* (Springer Dordrecht, 2012) [ISBN: 978-94-007-4646-6].
- V. Makhlaichuk, N.P. Malomuzh. Peculiarities of structure in aqueous electrolyte solutions and specificity of hydration effects. *J. Mol. Liq.* **349** (11), 118088 (2021).
- A.A. Guslisty, N.P. Malomuzh, A.I. Fisenko. Optimal temperature for human life activity. *Ukr. J. Phys.* **63** (9), 809 (2018).
- A.I. Fisenko, N.P. Malomuzh. Role of the H-bond network in the creation of life-giving properties of water. *Chem. Phys.* **345**, 164 (2008).
- A.I. Fisenko, N.P. Malomuzh. To what extent is water responsible for the maintenance of the life for warm-blooded organisms? *Int. J. Mol. Sci.* **10**, 2383 (2009).
- L.A. Bulavin, A.I. Fisenko, N.P. Malomuzh. What water properties are responsible for the physiological temperature interval limits of warm-blooded organisms? *arXiv* 1307.7295 (2013).
- L.A. Bulavin, V.Y. Gotsulskyi, N.P. Malomuzh, A.I. Fisenko. Crucial role of water in the formation of basic properties of living matter. *Ukr. J. Phys.* **65** (9), 794 (2020).
- L.A. Bulavin, N.P. Malomuzh. Upper temperature limit for the existence of the alive matter. *J. Mol. Liq. (Letter to the Editor)* **124**, 136 (2006).
- V. Bardik, A.I. Fisenko, S. Magazù, N.P. Malomuzh. The crucial role of water in the formation of the physiological temperature range for warm-blooded organisms. *J. Mol. Liq.* **306**, 112818 (2020).
- L. Melníková, V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, V.M. Garamus, L. Almásy, O.I. Ivankov, L.A. Bulavin, Z. Mitróová, P. Kopčanský. Effect of iron oxide loading on magnetoferritin structure in solution as revealed by SAXS and SANS. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **123**, 82 (2014).
- O.A. Kyzyma, T.D. Kyrey, M.V. Avdeev, M.V. Korobov, L.A. Bulavin, V.L. Aksenov. Non-reversible solvatochromism in N-methyl-2-pyrrolidone/toluene mixed solutions of fullerene C<sub>60</sub>. *Chem. Phys. Lett.* **556**, 178 (2013).
- V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, L. Almásy, L.A. Bulavin, V.L. Aksenov, L. Rosta, V.M. Garamus. Interaction of mono-carboxylic acids in benzene studied by small-angle neutron scattering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **337** (1–3), 91 (2009).
- A. Borowik, Y. Prylutsky, Ł. Kawelski, O. Kyzyma, L. Bulavin, O. Ivankov, V. Cherepanov, D. Wyrzykowski, R. Kaźmierkiewicz, G. Gołuński, A. Woźniwodzka, M. Evstigneev, U. Ritter, J. Piosik. Does C<sub>60</sub> fullerene act as a transporter of small aromatic molecules? *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **164**, 134 (2018).
- O.V. Khorolskyi, Y.D. Moskalenko. Calculation of the macromolecular size of bovine serum albumin from the viscosity of its aqueous solutions. *Ukr. J. Phys.* **65** (1), 41 (2020).

Одержано 26.03.23

*L.A. Bulavin, N.P. Malomuzh, O.V. Khorolskyi*

REDUCIBLE AND IRREDUCIBLE  
COMPONENTS OF THE pH VALUE IN DILUTE  
AQUEOUS SOLUTIONS OF SODIUM CHLORIDE

Main attention is paid to the definition of the reducible and irreducible components of pH in aqueous salt solutions and to the determination of their temperature and concentration dependences. It is shown that the temperature dependence of the reducible pH component in dilute aqueous solutions of sodium chloride has a linear character and differs from that in pure water only by the value of its slope, which increases, as the

salt concentration grows. At the same time, the temperature dependence of the irreducible pH component is non-monotonic and has a minimum at the temperature that is optimal for the human and mammalian life activities (36.6 °C). The existence of a characteristic salt concentration dividing the family of the temperature dependences of pH into two subfamilies with different behaviors of their temperature dependences has been established.

*Keywords:* aqueous solution, sodium chloride, pH, reducible component, irreducible component.