

УДК 538.9

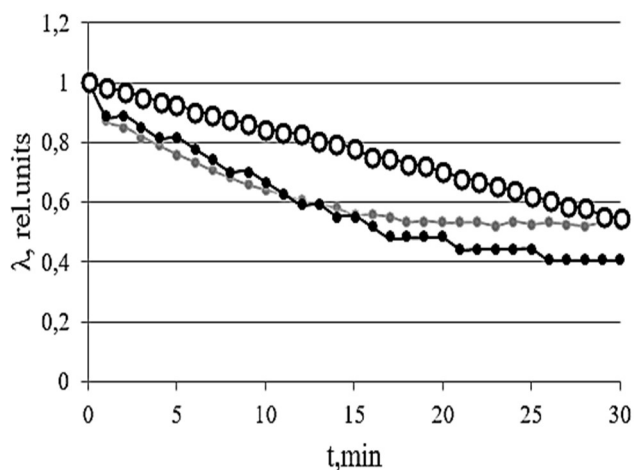
<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361460>**Вергун Л. Ю.<sup>1</sup>, Британ А. В.<sup>2</sup>, Свечнікова О. С.<sup>3</sup>***Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет,  
кафедра молекулярної фізики, E-mail: liena.vergun@knu.ua*ORCID iD: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0005-6086-6548><sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1754-6080><sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2337-6727>**Молекулярний механізм випаровування водного розчину глюкози,  
що піддавався дії магнітного поля**

Досліджується молекулярний механізм випаровування концентрованого розчину глюкози, що піддавався дії магнітного поля. Запропоновано розглядати концентрований водний розчин глюкози як пористу систему. Така система містить пори, що заповнені молекулами розчинника, та каркас, утворений кластерами молекул глюкози зв'язаними між собою водневими зв'язками. Досліджувались водні розчини глюкози виробництва з концентрацією 40%. Експериментально визначались часові залежності відносної зміни розміру намагніченої  $\lambda_m(t)$ , немагніченої краплини розчину глюкози  $\lambda_n(t)$  та краплини дистилату  $\lambda_w(t)$  при температурі  $T = 20$  °С. Показано, що в порівнянні із залежністю  $\lambda_w(t)$ , яка характеризує випаровування дистильованої води, для якої зміна розміру краплини відбувається лінійно, для рідинних систем, що містять молекули глюкози, залежність  $\lambda_n(t)$  та  $\lambda_m(t)$  має ділянки з відсутністю випаровування  $\lambda_n(t) = \text{const}$  і  $\lambda_m(t) = \text{const}$ . На цих ділянках в системах «вода-глюкоза» відбуваються молекулярні перебудови впродовж яких змінюється структура розчину (утворення та зміна форм агрегатів за рахунок перерозподілу водневих зв'язків між ними. За допомогою вимірювача густини та в'язкості DMA 4500 M (Anton Paar) визначалась густина та в'язкість ненамагніченого водного 40% розчину глюкози, намагніченого водного 40% розчину глюкози та дистильованої води при температурі  $T = 20$  °С. Використовуючи результати експериментів визначено вільний об'єм  $V_f$ , що відповідає об'єму пор в системі, для ненамагніченого розчину глюкози та розчину, що піддавався дії магнітного поля. Для концентрованої рідинної системи «вода-глюкоза», яка піддавалась дії магнітного поля запропонований молекулярний механізм випаровування. Цей механізм пов'язаний з тим, що після обробки постійним магнітним полем в рідинній системі, що досліджується, виникають стабільні комплекси, утворені за рахунок розгалуженнями водневих зв'язків навколо  $\beta$ -аномерів. Існування таких комплексів призводить до зміни швидкості переходу між  $\alpha$  та  $\beta$  конформаціями молекул глюкози, що приводить до періодичної зміни станів з наявністю та відсутністю випаровування в намагніченій рідинній системі, яка досліджується.

**Ключові слова:** випаровування, водний розчин глюкози, магнітне поле, пористість, густина.

**Вступ.** Питання щодо фізичних властивостей розчинів глюкози та механізмів процесів, можливих під дією зовнішніх чинників є актуальними для меди-

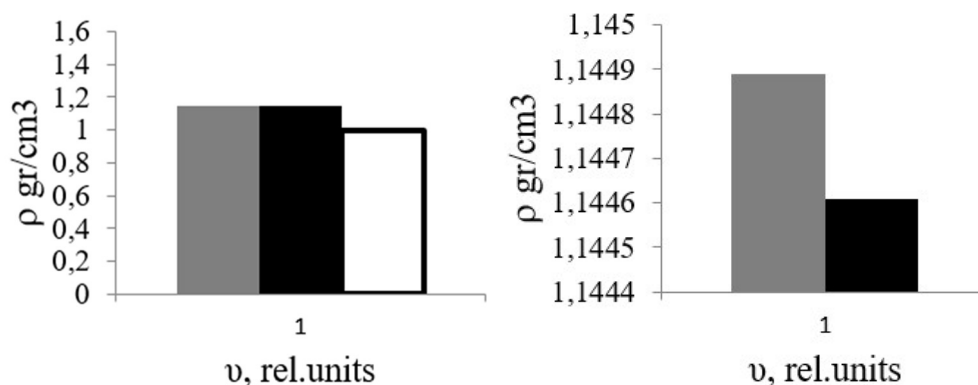
цини. Так, наприклад, розчини глюкози застосовуються в онкології для транспортування ліків [1], введення цих розчинів є одним із методів лікування пошкоджень хрящової тканини [2], важливим також є питання щодо створення сенсорів для визначення рівня глюкози в крові при захворюванні на цукровий діабет [3] та ін. На даний час в літературі зазначається, що дія на біологічні об'єкти спостерігається при слабких магнітних полях з величиною 1-10 мТ [3, 4]. Для таких параметрів магнітного поля експериментально визначено молекулярний механізм, який призводить до зміни структури рідинної системи «вода-глюкоза» [5]. Однак, як відомо авторам, молекулярний механізм, що супроводжує випаровування намагнічених розчинів глюкози на даний час не визначений. Таким чином метою даної роботи є встановлення молекулярного механізму випаровування розчину глюкози, обробленого магнітним полем.



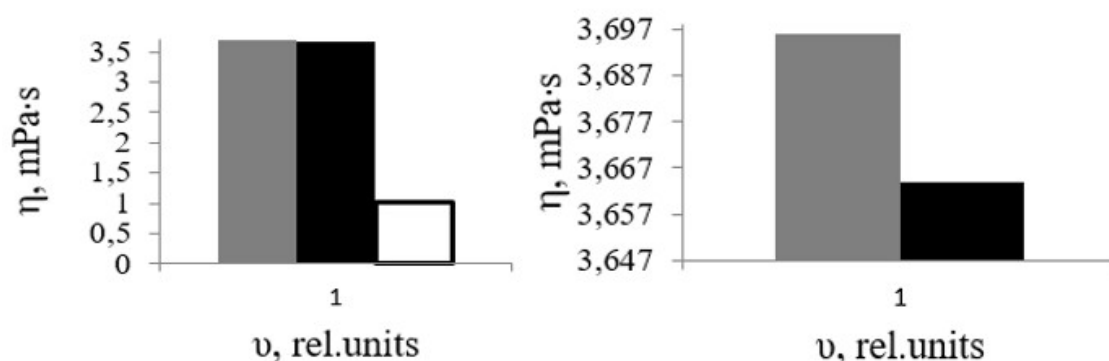
**Рис.1.** Часові залежності відносної зміни розміру намагніченої  $\lambda_m(t)$  (●), немагніченої краплі  $\lambda_n(t)$  (◐) та дистильованої води  $\lambda_w(t)$  (○) при температурі  $T=20^\circ\text{C}$

**Матеріали, методи та результати експерименту.** Досліджувались водні розчини глюкози виробництва ПРАТ фарм. фірма «Дарниця» з концентрацією 40% (1 мл розчину містить глюкози моногідрату 400 мг). Експериментально визначались зміни розмірів намагніченої краплі розчину та краплі розчину, яка не піддавалась дії магнітного поля за методикою, описаною в роботі [6]. Час витримки в магнітному полі складав 30 хвилин при індукції 1 мТ. На рис.1 наведені часові залежності відносної зміни розміру намагніченої  $\lambda_m(t)$  та немагніченої краплі розчину глюкози  $\lambda_n(t)$ , яка розраховувалась як відношення діаметру краплі у визначений час  $d_i$  до діаметру краплі в початковий момент часу  $d_0$ . Для порівняння на цьому рисунку зображено залежність часової залежності зміни розміри краплі дистилату  $\lambda_w(t)$ . Випаровування відбувалось при температурі  $T=20^\circ\text{C}$ .

За допомогою вимірювача густини та в'язкості *DMA 4500 M (Anton Paar)* визначалась густина та в'язкість немагніченого водного 40% розчину глюкози, намагніченого водного 40% розчину глюкози та дистильованої води при температурі  $T=20^\circ\text{C}$ . На рис.2а наведено гістограму розподілу густин при сталому відносному об'єму  $v = \text{const}$  досліджуваних системи, що дорівнює розміру комірки вимірювача густини *DMA 4500 M (Anton Paar)* при температурі  $T=20^\circ\text{C}$ . На рис.2.б наведено гістограму густин для немамагніченого 40% розчину глюкози та намагніченого розчину глюкози у збільшеному масштабі.



**Рис. 2.** Гістограма розподілу густин при сталому відносному об'єму  $v = \text{const}$  для ненемагніченого 40% розчину глюкози (●), ненемагніченого розчину (●) та дистильованої води (○) при температурі  $T=20^\circ\text{C}$  (а) у збільшеному масштабі для розчину (●) та розчину (○) (б)



**Рис. 3.** Гістограма розподілу динамічних в'язкостей при сталому відносному об'єму  $v = \text{const}$  для ненемагніченого 40% розчину глюкози (●), ненемагніченого розчину (●) та дистильованої води (○) при температурі  $T=20^\circ\text{C}$ - (а); у збільшеному масштабі для розчину (●) та розчину (○) - (б)

На рис.3 наведено гістограму розподілу динамічної в'язкості при сталому відносному об'єму досліджуваних системи  $v = \text{const}$ , що дорівнює розміру капіляра капілярного віскозиметра *DMA 4500 M (Anton Paar)* при температурі  $T=20^\circ\text{C}$ . На рис.3.б наведено гістограму розподілу динамічних в'язкостей для ненемагніченого 40% розчину глюкози та намагніченого розчину глюкози у збільшеному масштабі.

**Обговорення результатів.** Як видно з рис.1 для дослідженого 40% розчину глюкози, підданого дії магнітного поля залежність  $\lambda_m(t)$  має відмінності від залежності  $\lambda_n(t)$ , що описує поведінку ненемагніченого розчину. Ці відмінності починають спостерігатися з моменту часу  $t = 15$  хвилин від початку вимірювань. В порівняннях із залежністю  $\lambda_w(t)$ , що характеризує випаровування дистильованої води, для якої зміна розміру краплини відбувається лінійно, для рідинних систем, що містять молекули глюкози, залежність  $\lambda_n(t)$  та  $\lambda_m(t)$  має ділянки з відсутністю випаровування  $\lambda_n(t) = \text{const}$  і  $\lambda_m(t) = \text{const}$ . На цих ділянках в системах «вода-глюкоза» відбуваються молекулярні перебудови впродовж яких змінюється структура розчину (утворення та зміна форм агрегатів за рахунок перерозподілу водневих зв'язків між ними [8].

При концентраціях в околі 40% розчини моносахаридів набувають полімерних властивостей. Такі розчини можуть розглядатись як пористі структури, що містять пори, які заповнені водою та зв'язані між собою водневими зв'язками кластери молекул розчиненої речовини [8-9]. Для пористих систем в роботі [9] було введено поняття пористості. Це поняття пов'язане із зміною розміру, форм та взаємного розташування областей рідинної системи, що заповнена виключно молекулами розчинника. В моделі рідинної пористої системи її об'єм визначався за формулою

$$V = V_m + V_f, \quad (1)$$

де  $V_m$  – об'єм, зайнятий частинками,  $V_f$  – об'єм, де частинки відсутні ( вільний об'єм).

Пористість згаданого середовища визначалась формулою

$$\xi = \frac{V - V_m}{V}. \quad (2)$$

Також в роботі [9] була запропонована формула для розрахунку пористості по значенням густини, які визначались з експерименту

$$\xi = \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m}. \quad (3)$$

де  $\rho_m$  – густина матриці, а  $\rho$  – густина матриці разом з порами.

Порівнюючи вирази (1-3) для вільного об'єму  $V_f$  отримуємо формулу

$$V_f = \frac{V(\rho_m - \rho)}{\rho_m}. \quad (4)$$

Запозичивши із електронного ресурсу [10] значення густини кристалічної глюкози, рівне  $1.54 \text{ г/см}^3$  та приймаючи, розмір комірки для вимірювання густини  $1.5 \text{ мл}$  ( $1.5 \text{ см}^3$ ) визначимо за формулою (4) об'єм, зайнятий порами  $V_f$  для немагнічного водного розчину глюкози з концентрацією 40% та намагніченого водного розчину глюкози з концентрацією 40%. В таблиці 1 наведено результати розрахунку

Як видно з табл. 1 при  $T = 20^\circ\text{C}$  в рідинній системі «вода-глюкоза» з концентрацією 40% після витримки в постійному магнітному полі збільшується область, зайнята рідинною компонентою. Розглянемо можливий механізм цього процесу.

Відомо, що розчинах глюкози молекула розчиненої речовини переходить із  $\alpha$ - конформації в  $\beta$ -конформацію за рахунок розкриття піранозного кільця з переходом в лінійну форму та подальшому закриттю з утворенням іншої циклічної

Таблиця 1

Тип розчину	Немагнічений водний розчин глюкози з концентрацією 40%	Намагнічений водний розчин глюкози з концентрацією 40%
Об'єм, зайнятий порами, $\text{см}^3$	0.3848	0.3851

форми [11]. Отримані результати в цій роботі вказали на те, що під час молекулярної агрегації комплекси, що мають  $\beta$ -конформацію ( $\beta$ -аномери) є більш стабільніші за  $\alpha$ -аномери за рахунок утворення розгалужень водневих зв'язків. В роботі [5] було встановлено, що під дією магнітного поля в розчинах глюкози виникає турбулентних рух, який генерується рухом різних кластерів за рахунок гідродинамічної взаємодії [5]. З точки зору уявлення про 40% водний розчин глюкози як пористу структуру, що містить каркас та порожнини [8-9], будемо вважати, що під дією магнітного поля область пори збільшується за рахунок утворень розгалужень водневих зв'язків навколо  $\beta$ -аномерів, що відповідає гістограмам, наведеним на рис.2 та рис.3. [12] В подальшому це призводить до зміни форми каркасу. Надалі стабільність  $\beta$ -аномерів зменшується і відбувається перехід цих аномерів в  $\alpha$ -форму. Така періодичність зміни стабільності аномерів може призводити до автоколивального руху каркасу [13].

Запропонована гіпотеза добре узгоджується із експериментальними даними, представленими на рис.1. Як видно з цього рисунка розмір краплини, попередньо обробленого постійним магнітним полем, під час випаровування зменшується періодично. Підтвердженням зазначеного факту є ділянки  $\lambda_m(t) = const$  в часових інтервалах 16-20 хвилин, 21-25 хвилин, 26-30 хвилин.

**Висновки.** В роботі запропоновано розглядати концентрований водний розчин глюкози як пористу систему. Така система містить пори, що заповнені молекулами розчинника, та каркас, утворений кластерами молекул глюкози зв'язаними між собою водневими зв'язками. Для концентрованої рідинної системи «вода-глюкоза», яка піддавалась дії магнітного поля запропонований молекулярний механізм випаровування. Цей механізм пов'язаний з тим, що після обробки постійним магнітним полем в рідинній системі, що досліджується, виникають стабільні комплекси, утворені за рахунок розгалуженнями водневих зв'язків навколо  $\beta$ -аномерів. Існування таких комплексів призводить до зміни швидкості переходу між  $\alpha$  та  $\beta$  конформаціями молекул глюкози, що приводить до періодичної зміни станів з наявністю та відсутністю випаровування в намагнічений рідинній системі, яка досліджується.

### Література

1. Pliszka Monika, Leszek Szablewski. Glucose Transporters as a Target for Anti-cancer Therapy. *Cancers*. 2021. Vol.13.no. 31.P. 4184-4202. <https://doi.org/10.3390/cancers13164184>.
2. Ross A. Hauser, Johanna B. Lackner, Danielle Steilen-Matias *at al* A Systematic Review of Dextrose Prolotherapy for Chronic Musculoskeletal Pain. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord*. 2016. no.9. P.139–159. <https://doi: 10.4137/CMAMD.S39160>.
3. Gorczynska E, Wegrzynowicz R. Glucose homeostasis in rats exposed to magnetic fields. *Invest Radiol*. 1991. Vol.26. no.12. P.1095-100. <https://doi: 10.1097/00004424-199112000-00013>.

4. Schenck John F. Safety of Strong, Static Magnetic Fields. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2000. Vol. 12. P.2–19. [https://doi.org/10.1002/1522-586\(200007\)12:1<2::aid-jmri2>3.0.co;2-v](https://doi.org/10.1002/1522-586(200007)12:1<2::aid-jmri2>3.0.co;2-v).
5. Bulavin L.A., Vergun L.Yu., Zabashta Yu.F., Ogorodnik K.O., Demydyuk F.F.. Turbulence in aqueous glucose solutions induced by magnetic field. *Ukr. J. Phys.* 2016. Vol. 61, no. 8. P.722-726. <https://doi.org/10.15407/ujpe61.08.0727>
6. Savenko V.S., Verbinska G.M., Bulavin L.A. Computer simulation of evaporation process of NaCl aqueous solution. *Ukr. J. Phys.* 2016. Vol. 61. no.9. P.818-824. <https://doi.org/10.15407/ujpe61.09.0812>.
7. Kuhn W. Ludwig, Hihn Jean-Yves et al. Comparing and combining methods that enhance liquid–gas mass transfer in a batch reactor: Ultrasonic degassing, aeration by gas bubbling, and liquid agitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. no. 119. P.107389-107400. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107389>.
8. Molinero Valeria, Cagin Tahir, Goddard William A. Sugar, water and free volume networks in concentrated sucrose solutions. *Chemical Physics Letters*. 2003. no.377. P.469–474. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)01170-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)01170-9).
9. Lazarenko Maksym, Zabashta Yuriy, Oleksandr Alekseev et al. A novel method to determine porosity of polymer solutions. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2025. Vol. 769. Issue 15-18. P.1432-1441. <https://doi.org/10.1080/15421406.2025.2528273>.
10. Електр.рес. [https://m.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB2250047\\_EN.htm](https://m.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB2250047_EN.htm).
11. Usabiaga Imanol, Gonzalez Jorge, León Iker. Influence of the Anomeric Conformation in the Intermolecular Interactions of Glucose. *J. Phys. Chem. Lett.* 2017. Vol. 8. no. 6. P.1147–1151 <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.7b00151>.
12. Kohsuke Takeda, Tomohisa Norisuye, Qui Tran-Cong-Miyata. Origin of the anomalous decrease in the apparent density of polymer gels observed by multi-echo reflection ultrasound spectroscopy. *Ultrasonics*. 2013. Vol.53. no.5, P.973-978. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.01.004>.
13. Bulavin L.A., Zabashta Yu.F., Lazarenko M.M. et al. Autowaves induced by first-order phase transitions. *Ukr. J. Phys.* 2022. Vol. 67. no. 4. p.270-276. <https://doi.org/10.15407/ujpe67.4.270>

Дата надходження: 31.01.2026

Дата прийняття до друку: 27.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

**L. Vergun, A. Brytan, O. Svechnikova**

**Molecular mechanism of evaporation of aqueous glucose solution treated in a magnetic field**

**Summary**

*The molecular mechanism of evaporation of a concentrated glucose solution exposed to a magnetic field is studied. It is proposed to consider a concentrated aqueous glucose solution as*

*a porous system. Such a system contains pores filled with solvent molecules and a framework formed by clusters of glucose molecules bound together by hydrogen bonds. Aqueous glucose solutions of production with a concentration of 40% were studied. The time dependences of the relative change in the size of the magnetized  $\lambda_m(t)$ , non-magnetized drop of glucose solution  $\lambda_n(t)$  and the distillate drop  $\lambda_w(t)$  at a temperature  $T = 20^\circ\text{C}$  were experimentally determined. It is shown that in comparison with the dependence  $\lambda_w(t)$ , which characterizes the evaporation of distilled water, for which the change in droplet size occurs linearly, for liquid systems containing glucose molecules, the dependence  $\lambda_n(t)$  and  $\lambda_m(t)$  has areas with no evaporation  $\lambda_n(t) = \text{const}$  and  $\lambda_m(t) = \text{const}$ . In these areas in the “water-glucose” systems, molecular rearrangements occur, during which the solution structure changes (formation and change in the shapes of aggregates due to the redistribution of hydrogen bonds between them). Using the DMA 4500 M density and viscosity meter (Anton Paar), the density and viscosity of a non-magnetized aqueous 40% glucose solution, a magnetized aqueous 40% glucose solution, and distilled water were determined at a temperature of  $T = 20^\circ\text{C}$ . Using the results of the experiments, the free volume  $V_f$  was determined, which corresponds to the volume of pores in the system, for a non-magnetized glucose solution and a solution exposed to a magnetic field. A molecular mechanism of evaporation was proposed for a concentrated liquid “water-glucose” system exposed to a magnetic field. This mechanism is due to the fact that after treatment with a constant magnetic field in the liquid system under study, stable complexes arise, formed by branching hydrogen bonds around  $\beta$ -anomers. The existence of such complexes leads to a change in the rate of transition between  $\alpha$  and  $\beta$  conformations of glucose molecules, which leads to a periodic change of states with the presence and absence of evaporation in the magnetized liquid system under study.*

**Keywords:** *evaporation, aqueous glucose solution, magnetic field, porosity, density.*