

О. Б. АЛМАЗОВА, ст. викл., Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків,
М. Л. ЛИСИЧЕНКО, д-р техн. наук, Державний біотехнологічний університет, Харків

ПЕРЕРОЗПОДІЛ ГАЗУ МІЖ ОБ'ЄМНОЮ ТА БУЛЬБАШКОВОЮ ФАЗОЮ У ВОДІ, ЩО ОПРОМІНЕНА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ХВИЛЯМИ НИЗЬКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

Одержано, що опромінення рідкої води електромагнітними хвилями низької інтенсивності сантиметрового діапазону забезпечує зростання вільного повітря, що міститься у воді. Це збільшення викликане перенесенням у бульбашки частини газу, що розчинений у воді. Бульбашковим механізмом можна пояснити ефекти впливу низькоінтенсивних електромагнітних хвиль на біологічні рідини. Табл.: 1. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: електромагнітні хвилі; опромінення; повітряні бульбашки.

Постановка проблеми. У багатьох технологічних процесах використовуються вода та водні розчини. Якість кінцевого продукту значною мірою визначається параметрами води. Актуальними є роботи з пошуку безконтактних способів зміни властивостей води шляхом опромінення її електромагнітними (ЕМ) хвилями. Важливим питанням залишається встановлення механізму, яким ЕМ хвилі впливають на властивості води. Так як біологічні рідини є водними розчинами, можна припустити, що вплив ЕМ випромінювання на них відбуватиметься за тим самим механізмом, що у воді або водних розчинах.

Аналіз літератури. У роботах [1 – 7] продемонстровано вплив ЕМ полів на параметри води. Наприклад, у [1, 3 – 7] отримано, що дія (при кімнатній температурі) на водні зразки ЕМ хвиль низької інтенсивності (не перевищує 10 мВт/см^2) змінює деякі фізичні властивості води (зокрема, оптичну щільність), які потім зберігаються протягом десятків хвилин. Автори вважають, що спостережений результат – прояв значних змін у структурі рідкої води. Таке пояснення не може бути визнано коректним, оскільки, як відомо, інтервали часу між послідовними зіткненнями молекул у рідині (при кімнатній температурі) становлять $\tau_3 \sim 10^{-12} \div 10^{-11} \text{ с}$ [8]. Ця обставина виключає можливість прийняти, що змінені структурні перебудови у воді зберігатимуться протягом часу, що більш ніж на 12 порядків перевищує τ_3 .

Метою даної роботи є встановлення послідовності подій, що призводять до збільшення оптичної щільності зразка води, що опромінюється ЕМ хвилями.

Теоретичні передумови. Для пояснення результатів [3 – 7] розглянемо припущення, згідно з яким відповідальність за зміни оптичних властивостей рідини несе збільшення розмірів макроскопічних газових включень (бульбашок), що містяться у воді. ЕМ хвилі низької інтенсивності може збільшити їх сумарний обсяг, тим самим, на порівняно тривалий час змінити деякі властивості рідини.

Якщо ЕМ хвилі (частоти ω) опромінюють зразок, то в одиниці об'єму останнього кожен секунду виділяється теплова енергія [9]:

$$q_v = \omega [\varepsilon_0 \varepsilon'' (E^2)_{\text{ср}} + \mu_0 \mu'' (H^2)_{\text{ср}}]. \quad (1)$$

Тут ε'' та μ'' – уявні частини відносних діелектричної проникності середовища та магнітної проникності середовища, відповідно; ε_0 – електрична стала; μ_0 – магнітна стала; E і H – напруженості електричної та магнітної компонент поля хвилі в опромінену середовищі, а індекс "ср" означає усереднення за часом.

У воді завжди є повітряні бульбашки; на конкретну бульбашку радіуса a діє так звана термокапілярна сила, що викликає поступальний рух бульбашки в полі температурного градієнта [10]:

$$F_T = - 2 \pi a^2 \text{grad } T d\sigma/dT. \quad (2)$$

Тут σ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі газу та рідини; T – температура.

Переміщення бульбашки в рідкому зразку здійснюється не тільки завдяки термокапілярній силі: крім неї, на неї діють і підйомна (архімедова) сила, і сила, спричинена наявністю градієнта напруженості електричного поля електромагнітної хвилі, що розповсюджується у воді (т.зв. електрична "градієнтна" сила), і сила променевого тиску, і сили, що зумовлюють броунівський рух бульбашки.

Рухаючись під впливом зазначених сил, бульбашка відчуває деформації, у неї збуджуються коливання. Коливання бульбашки, безумовно, збуджуються і акустичним полем, породженим температурною хвилею, що виникає при ЕМ опроміненні. Резонансна частота бульбашки (для випадку, коли амплітуда коливань мала порівняно з радіусом бульбашки a) визначається із співвідношення [11]:

$$f_0 = (2 \pi a)^{-1} \cdot [3 \gamma \rho^{-1} (P_h + 2 \sigma / a)]^{1/2}, \quad (3)$$

де P_h – гідростатичний тиск у рідині; γ – відношення питомих теплоємностей c_p/c_v газу; ρ – щільність рідини. З цього виразу випливає, що у воді повітряні бульбашки радіусу $a_1 = 10^{-6}$ м резонують на частоті $f_1 \approx 4 \cdot 10^6$ Гц, бульбашки радіусу $a^2 = 10^{-7}$ м – на частоті $f_2 \approx 10^8$ Гц, а бульбашки радіусу $a_3 = 10^{-9}$ м резонують на частоті $f_3 \approx 10^{11}$ Гц. Резонуюча бульбашка періодично змінює свій радіус, пульсує. Пульсуюча бульбашка у воді є акустичним випромінювачем першого порядку. Такий випромінювач називають монополюм; характеристики випромінюваного ним поля докладно розглянуті в [13]. Оскільки у воді міститься величезна кількість повітряних бульбашок різних радіусів (їхній статистичний ансамбль описується функцією розподілу за розмірами [11, 12]), у рідині реалізується широкий спектр акустичних частот, обумовлений пульсаціями бульбашок.

Розглянемо реальне середовище, що є рідкою матрицею, в якій розчинене повітря з виваженими в ній газовими бульбашками. Врахуємо, що концентрація розчиненого у рідині газу пропорційна тиску цього газу над його поверхнею (закон Генрі). Отже, рівноважна концентрація повітря, розчиненого у воді при атмосферному тиску дорівнює

$$C_0 = k_{\Gamma} P_{\text{атм}}. \quad (4)$$

Тут k_{Γ} – коефіцієнт Генрі. Відповідно, поблизу поверхні бульбашки встановлюється концентрація повітря

$$C_a = k_{\Gamma} P_g = k_{\Gamma} P_{\text{атм}} [1 + 2 \sigma / (P_{\text{атм}} a)]. \quad (5)$$

Якщо ввести в розгляд C_{∞} – концентрацію розчиненого повітря далеко від бульбашки (тобто на відстані $\Lambda \gg a$), то можна записати вираз для дифузійного потоку газових молекул (закон Фіка) через прикордонний (прибульбашковий) шар рідини товщиною d :

$$J = D (C_{\infty} - C_a) S_a d^{-1}. \quad (6)$$

Тут D – коефіцієнт дифузії газових молекул; S_a – поверхня бульбашки, $S_a = 4\pi a^2$. Напрямок потоку газових молекул (в середину бульбашки або з нього – назовні) залежить від співвідношення між концентрацією газу в рідині далеко від бульбашки (C_{∞}) і концентрацією біля поверхні бульбашки (C_a).

Можливі три варіанти співвідношення концентрацій:

1. $C_{\infty} > C_a$. Рідина перенасичена газом і потік газових молекул направлений в бульбашку. При цьому бульбашка збільшує свої розміри.

2. $C_{\infty} < C_0$, отже, виконується і умова $C_{\infty} < C_a$. Рідина недонасичена газом. Потік газових молекул спрямований із бульбашки. Бульбашка зменшується в розмірах.

3. $C_\infty = C_a$. (Або $C_\infty = C_0 = C_a$ для "великих" бульбашок, таких, у яких $2\sigma / (P_{\text{атм}} a) \ll 1$). Цей випадок відповідає насиченій рідині. Бульбашка зберігає свій радіус незмінним (стабільним), рівним a_0 . В цьому випадку

$$C_a^{\text{стаб}} = C_0 [1 + 2 \sigma / (P_{\text{атм}} a_0)]. \quad (7)$$

Ми розглянули умови, за яких газ у бульбашці перебуває у рівновазі з газом, розчиненим у рідині. Врахуємо факт наявності акустичного поля у рідині. Бульбашка в акустичному полі пульсує, тобто поперемінно стискається і розширюється. При розширенні бульбашки концентрація газу в ньому зменшується і газ (згідно з виразом (6)) дифундує з рідини в бульбашку. При наступній фазі коливання бульбашка стискається і відбувається дифузія газу з бульбашки в рідину. Кількість газу, що дифундує пропорційно площі поверхні бульбашки ($S_a = 4\pi a^2$), яка у стадії розширення більша, ніж у стадії стиснення. Через це повної компенсації дифузійних потоків (за інтервал часу, що дорівнює періоду пульсації) не відбувається; маса газу, що заповнила бульбашку в процесі його розширення, перевищує масу газу, що пішов з бульбашки при його стиску, так що в цілому за період кількість газу в бульбашці зростає. Цей потік прийнято називати випрямленим (одностороннім) дифузійним потоком, а саме явище – випрявленою (односторонньою) дифузією [14 – 16]. У результаті, в акустичному полі розміри бульбашок зростають, сумарний обсяг "бульбашкового" повітря у воді збільшується.

Проти збільшення сумарного обсягу "бульбашкового" повітря у ємності з рідиною діє теплова конвекція. Вона забезпечує конвективне великомасштабне переміщення великих мас рідини, виносячи на вільну поверхню бульбашки, що виростили, які залишають рідке середовище. Тому ефект зростання сумарного обсягу бульбашок можна спостерігати лише при порівняно низьких інтенсивностях опромінюючих ЕМ хвиль (обмеження близько 10 мВт/см^2). При високих інтенсивностях, конвекція, що активізується в рідкому обсязі, перешкоджає збереженню бульбашок, що виростили, у ємності з рідиною.

Експериментальні результати. Використовувалися зразки двічі дистильованої води (об'єм $0,6 \text{ см}^3$), вміщені у пробірку зі скла сорту "пірекс". Опромінення велося генератором типу Г 4 – 83 (довжина хвилі $3,2 \text{ см}$; інтенсивність 5 мВт/см^2).

Контроль концентрації вільного повітря у воді (визначення об'ємної частки вільного повітря – V_F) здійснювався за допомогою ядерного магнітного резонансу (ЯМР) за методикою, що передбачає вимірювання часів ядерної магнітної релаксації [17]. Суть її полягає у використанні кількісних залежностей між розмірами макроскопічних газових включень,

що містять парамагнітні молекули, та часом поперечної магнітної релаксації. І опромінення та вимірювання велися за кімнатної температури.

Таблиця 1

Залежність об'ємної частки вільного повітря від тривалості опромінення

Тривалість опромінення, хв.	0	30	60	150	210
Об'ємна доля вільн. повітря, 10^{-8}	5,2 $\pm 0,3$	12,0 $\pm 0,4$	15,9 $\pm 0,4$	20,2 $\pm 0,4$	21,0 $\pm 0,5$

Як випливає з таблиці, опромінення води призводить до зростання обсягу "бульбашкового" повітря. Зростання розмірів бульбашок – розсіювальних центрів у воді, що піддана опроміненню, мабуть, стало основною причиною, що дозволила авторам робіт [3 – 7] зафіксувати збільшення оптичної щільності водних зразків.

Після припинення опромінення змінена величина V_F повільно відновлюється (за час, порядку тривалості опромінення) до вихідного значення, тобто до того, яким мав зразок до опромінення ($5,2 \cdot 10^{-8}$). Процес цей реалізується порівняно повільно, оскільки йде за дифузійним механізмом.

Висновки.

1. Пульсуючі у водному зразку повітряні бульбашки збільшують свої розміри в температурному полі, створеному опромінюючими електромагнітними хвилями. Ця обставина підвищує розмір світлорозсіювання (і оптичну щільність) водного зразка.

2. Зі зростанням тривалості опромінення об'ємна частка вільного "бульбашкового" повітря збільшується.

3. Низькоінтенсивні ЕМ хвилі, забезпечуючи функціонування механізму зростання повітряних бульбашок, регулюють вміст газу у воді. Природно очікувати, що цей механізм функціонуватиме і при опроміненні такої складної системи, як водна суспензія живих клітин. Зростання розмірів бульбашок у такій системі може призвести до важливих ефектів, наприклад, зменшення товщини прилеглого до клітини, прикордонного "примембранного" дифузійного шару рідини. Таке зменшення, стимулюючи обмін речовин між клітиною та міжклітинним середовищем, викликає зміну "стандартного" режиму функціонування клітини [18].

Список літератури:

1. Bogdanov E.V. Equicluster Water Model / E.V. Bogdanov, G.M. Mantrova // Critical Reviews in Biomedical Engineering – 2001, Vol.29. – Iss. 3. – P. 375-385.

2. *Yokono T.* Ultra-red spectroscopic study of structural change of liquid water induced by sunlight irradiation / *T.Yokono, S.Shimokawa, M.Yokono* // *Water* – 2009, Vol. 1. – P. 29-34.
3. *Плаксин И.Н.* Влияние частоты электрического поля на оптические и структурные свойства воды / *И. Н. Плаксин, С.А. Брунс, В.А. Чантурия, Р. Ш. Шафеев* // *ДАН СССР*. – 1966. – Т. 168 – № 1. – С. 152-153.
4. *Mghaiouini R.* Optical properties of water under the action of the electromagnetic field in the infrared spectrum / *R. Mghaiouini, N. Benyibira, H.E. Belghiti* // *Materials Today; Proceedings* – 2020, Vol.30. – Part 4. – P.1046-1051.
5. *Киселев, В.Ф.* О влиянии слабых магнитных полей и СВЧ – излучения на некоторые диэлектрические и магнитные свойства воды и водных растворов / *В.Ф. Киселев, А.М. Салецкий, А.П. Семихина* // *Теоретическая и экспериментальная химия*. – 1988. – № 3. – С. 330-334.
6. *Horikoshi Satoshi* Unusual Effect of the Magnetic Field Component of the Microwave Radiation on Aqueous Electrolyte Solutions / *Satoshi Horikoshi, Takuya Sumi* // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* – 2012, Vol.46. – Iss.4. – P. 215-228.
7. *Mynziak D.Y.* Influence of non-thermal intensity EHF radiation on properties of water and NaCl aqueous solutions / *D.Y. Mynziak, P.P. Loshitskiy, O. Korostynska, A. Mason* // *Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) IEEE XXXIII. International Scientific Conference 2013*.
8. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей / *Я.И. Френкель*. – Ленинград: Наука, 1976. – 592 с.
9. *Ландау Л.Д.* Электродинамика сплошных сред / *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
10. *Кузнецов В.М.* О движении газовых пузырьков в жидкости под действием градиента температур / *В.М. Кузнецов, Б.А. Луговцов, Е.И. Шер* // *Журнал прикладной математики и теор. физики*. – 1966. – № 1. – С. 124-126.
11. *Гаврилов Л.Р.* Содержание свободного газа в жидкостях и методы его измерения / *Л.Р. Гаврилов* // *Физика и техника мощного ультразвука. Книга 3. Физические основы ультразвуковой технологии* / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 395-426.
12. *Slot T.K.* A Simple and Efficient Device and Method for Measuring The Kinetics of Gas-Producing Reactions / *T.K.Slot, N.R. Shiju, G. Rotenberg* // *Angewandte Chemie, International Edition* - 2019, Vol.58. – Iss. 48. – P.17273-17276.
13. *Исакович М.А.* Общая акустика / *М.А. Исакович*. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
14. *Hsieh D.G.* Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles / *D.G. Hsieh, M.S. Plesset* // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1961. – Vol. 33, № 2. – P. 206-215.
15. *Valee P.* Effect of Pulsed Low-Frequencies Electromagnetic Fields on Water Characterized by Light Scattering Techniques Roll of Bubbles / *P. Valee, J. Lafait, L. Lugrand, P. Mentre* // *Langmuir* – 2005, Vol. 21, Iss. 6. – P. 2293-2299.
16. *Smith W.R.* A theoretical model for the growth of spherical bubbles by rectified diffusion / *W.R. Smith, Q. Wang* // *Journal of Fluid Mechanics* – 2022, Vol. 939. – A28 (1-16).
17. *Емец Б. Г.* Определение методом ядерного магнитного резонанса средних размеров и концентрации воздушных пузырьков, содержащихся в воде / *Б.Г. Емец* // *Письма в Журнал технической физики*. – 1997. – Т. 23, № 13. – С. 42-45.
18. *Алмазова Е.Б.* О механизме влияния газоразрядной ртутной ультрафиолетовой лампы на толщину примембранного водного слоя эритроцитов человека / *Е.Б. Алмазова, Б.Г. Емец* // *Біофізичний вісник*. – 2008. – вип. 21 (2). – С. 88-94.

Bibliography:

1. Bogdanov, E.V., Mantorova, G.M. (2001) "Equicuster Water Model", *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, Vol.29, Iss.3, pp. 375-385.
2. Yokono, T., Shimokawa, S., Yokono, M. (2009) "Ultra-red spectroscopic study of structural change of liquid water induced by sunlight irradiation", *Water*, Vol.1, pp.29-34.
3. Plaksin, I.N., Bruns, S.A., Chanturia, V.A. and Shafeev, R.Sh.(1966.) "Influence of electric field frequency on optical and structural properties of water", *DAS USSR*, V.168, № 1. pp.152-153.
4. Mghaiouini, R., Benyibira, N., Belghiti, H.E. (2020) "Optical properties of water under the action of the electromagnetic field in the infrared spectrum", *Materials Today; Proceedings*, Vol.30, Part 4, pp.1046-1051.
5. Kiselev, V.F., Saletsky, A.M. and Semikhina, A.P. (1988.) "On the influence of weak magnetic fields and microwave radiation on some dielectric and magnetic properties of water and aqueous solutions", *Theoretical and experimental chemistry*, № 3, pp. 330-334.
6. Horikoshi, Satoshi, Sumi, Takuya (2012) "Unusual Effect of the Magnetic Field Component of the Microwave Radiation on Aqueous Electrolyte Solutions", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol.46, Iss.4, pp. 215-228.
7. Mynziak, D.Y., Loshitskiy, P.P., Korostynska, O., Mason, A. (2013) "Influence of non-thermal intensity EHF radiation on properties of water and NaCl aqueous solutions", *Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) IEEE XXXIII. International Scientific Conference*.
8. Frenkel, Ya.I. (1976), *Kinetic theory of liquids*, Leningrad, Science, 592 p.
9. Landau, L.D., Lifshitz, E.M. (1982), *Electrodynamics of continuous media*, M., Science, 620 p.
10. Kuznetsov, V.M. , Lugovtsov, B.A. and Sher, E.I. (1966), "On the motion of gas bubbles in a liquid under the action of a temperature gradient", *Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, № 1, pp. 124-126.
11. Gavrilov, L.R. (1970), "The content of free gas in liquids and methods for its measurement". In Rozenberg, L.D. (Ed.), *Physics and technology of powerful ultrasound, V. 3, Physical foundations of ultrasonic technology*, M., Science, pp. 395-426.
12. Slot, T. K., Shiju, N. R., Rotenberg, G. (2019) "A Simple and Efficient Device and Method for Measuring The Kinetics of Gas-Producing Reactions", *Angewandte Chemie, International Edition* , Vol.58, Iss. 48, pp.17273-17276.
13. Isakovich, M.A. (1973), *General acoustics*, M., Science, 495 p.
14. Hsieh, D.G.and Plesset, M.S. (1961) "Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles", *J. Acoust. Soc. Amer*, Vol. 33, № 2, pp. 206 - 215.
15. Valee, P., Lafait, J., Lugrand, L., Mentre, P. (2005) "Effect of Pulsed Low-Frequencies Electromagnetic Fields on Water Characterized by Light Scattering Techniques Roll of Bubbles", *Langmuir*, Vol. 21, Iss. 6, pp. 2293–2299.
16. Smith, W.R., Wang, Q. (2022) "A theoretical model for the growth of spherical bubbles by rectified diffusion", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 939, A28 (1-16).
17. Yemets, B. G. (1997), "Determination by the method of nuclear magnetic resonance of the average size and concentration of air bubbles contained in water", *Letters to the Journal of Technical Physics*, V. 23, № 13, pp. 42-45.
18. Almazova, E.B. and Yemets, B.G. (2008) "On the mechanism of the influence of the radiation of a gas-discharge mercury ultraviolet lamp on the thickness of the near-membrane water layer of human erythrocytes". *Biophysical Bulletin.*, Is. 21 (2), pp. 88-94.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Поступила (received) 06.07.2022

Almazova Olena, senior lecture,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
O Yarosh str., 11a, ap.16, Kharkiv, Ukraine, 61045
Tel.:+38 050 275 93 19, e-mail: alonushka.alona27@gmail.com
ORCID ID:0000-0003-3226-6703

Lysychenko Mykola, professor, doctor of technical sciences,
State Biotechnological University (SBTU),
Risdivjna str., 19, Kharkiv, , Ukraine, 61052
Department of the electromechanics and robotics
Tel.: +38 050 229 87 43, e-mail: aemc-lysychenko@ukr.net
ORCID ID:0000-0002-4424-0159

УДК 537.868 + 612.014.481

Перерозподіл газу між об'ємною та бульбашковою фазою у воді, що опромінена електромагнітними хвилями низької інтенсивності / Алмазова О.Б., Лисиченко М.Л. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2022. – № 1–2 (7–8). – С. 31–39.

Одержано, що опромінення рідкої води електромагнітними хвилями низької інтенсивності сантиметрового діапазону забезпечує зростання вільного повітря, що міститься у воді. Це збільшення викликане перенесенням у бульбашки частини газу, що розчинений у воді. "Бульбашковим" механізмом можна пояснити ефекти впливу низькоінтенсивних електромагнітних хвиль на біологічні рідини. Табл.: 1. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: електромагнітні хвилі; опромінення; повітряні бульбашки.

UDC 537.868 + 612.014.481

Redistribution of gas between the bulk and bubble phases in water irradiated with low-intensity electromagnetic waves / Almazova O.B., Lysychenko M.L. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2022. – № 1–2 (7–8). – P. 31–39.

It has been established that the irradiation of liquid water with low-intensity electromagnetic waves of the centimeters range provides:

1. Increasing the amount of light scattering (and optical density) of the water sample.
2. An increase in the volume of free air contained in the water.

These changes are due to the transfer of part of the gas dissolved in water into air bubbles.

The mechanism "bubble" can explain the effects of low-intensity electromagnetic waves on biological fluids. Also, a change in the "standard" mode of functioning of a living cell. Tabl.: 1. Refs.: 18 titles.

Keywords: electromagnetic waves; irradiation; air bubbles.