

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асист.,
О. О. ГАПОНЕНКО, І. О. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники
Криворізький національний університет

ПОПЕРЕДНЄ ОБРОБЛЕННЯ ПУЛЬПИ УЛЬТРАЗВУКОМ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ РУДНИХ ЗЕРЕН ТА ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ ФЛОКУЛОУТВОРЕНЬ НА ОСНОВІ ЕФЕКТИВ КАВІТАЦІЇ

Метою дослідження є підвищення ефективності флотаційного доведення магнетитових концентратів шляхом дезінтеграції рудних флокулоутворень та очищення поверхні часток.

Методи дослідження. При дослідженні процесу флокулоутворення та дефлокуляції враховано залежність величини магнітної сприйнятливості часток рудної сировини від тривалості намагнічування. Результати експериментальних досліджень використання пристрою розмагнічування часток залізорудної пульпи, одержані із застосуванням ультразвукового гранулометра «Пульсар».

Наукова новизна. На підставі дослідження закономірностей протікання кавітаційних процесів одержано залежності, які дозволяють визначити оптимальну частоту високоенергетичного ультразвуку для підтримання кавітаційних процесів у залізорудній пульпі у залежності від параметрів її складових.

Практичне значення. На основі результатів моделювання встановлено, що для підвищення якості очищення часток руди перед флотацією доцільно здійснювати просторовий вплив на залізорудну пульпу, який включає комбінацію високоенергетичного ультразвуку з частотою 20 кГц в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами з частотою від 1 до 5 МГц та імпульсного магнітного поля спадної напруженості.

Результати. Запропоновано застосовувати нелінійні ефекти поля високоенергетичного ультразвуку та дослідити особливості формування кавітаційних режимів у залізорудній пульпі для дезінтеграції рудних флокулоутворень та очищення поверхні часток рудної сировини. На основі узагальненої моделі динаміки руху повітряних бульбашок, представленої у вигляді рівняння Рейля-Плессета, розраховано параметри ультразвукового впливу для формування і підтримання у залізорудній пульпі кавітаційних процесів і акустичних течій. Для моделювання процесу поширення ультразвукового сигналу в рідкому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку та зміни щільності використовують метод k -space першого й другого порядку, заснований на системі лінійних рівнянь першого порядку. Розрахунок потужності високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє підтримувати кавітаційні режими у залізорудній пульпі, здійснювався на основі результатів дослідження поширення фронту ультразвукового імпульсу за допомогою комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: ультразвук, кавітація, залізорудна пульпа, дезінтеграція, флокулоутворення.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-3-8

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Під дією ультразвуку в рідкому середовищі відбуваються фізичні, хімічні та фізико-хімічні процеси, до яких відносять: кавітацію, радіаційний тиск і ультразвукові потоки [1,2]. Оскільки рідини є чутливими до розтяжних зусиль, отже під впливом потужних ультразвукових коливань у рідині виникають зони стиснення та розрідження. При проходженні фази хвилі, що створює розрідження, у рідині утворюється велика кількість розривів у вигляді кавітаційних бульбашок, які в наступній фазі стиснення різко закриваються. Різницю в дії ультразвуку на окремі мінерали було успішно використано в низці робіт [3-5]. Наприклад, встановлено можливість подрібнення мінералів шаруватої структури (графіт, молібденіт) до високого ступеня дисперсності. Процес подрібнення молібденіту в умовах надлишкового статичного тиску дозволяє за один і той же час отримати продукт, дисперсність якого в 2-3 рази вища від дисперсності продукту, одержуваного при атмосферному тиску [3]. Отже, застосування ультразвуку при переробці рудної сировини залишається актуальною сферою і потребує подальших досліджень..

Аналіз досліджень та публікацій. Впровадження ультразвуку у водну систему переробки рудної сировини забезпечує специфічну активацію на основі двох фізичних явищ: акустичної кавітації та акустичного вітру [6-9]. Виділення газу у процесі акустичної кавітації є найбільш переважним при меншій частоті в діапазоні від 20 до 40 кГц, тоді як акустичний вітер домінує на частотах вище 400 кГц та 1 МГц в ультразвуковій та мегазвуковій системах відповідно [6]. Швидкий розпад кавітаційних бульбашок не тільки спричиняє дефрагментацію часток, але й створює значну силу зсуву в об'ємному середовищі, що призводить до генерування енергійних ефектів перемішування та акустичного вітру. Поєднання цих ефектів призводить до розриву

вугільно-домішкових зв'язків, видалення шламового покриття з вугілля, забивання реагенту в серцевину часток, поліпшення масообміну, збільшення площі поверхні часток вугілля і, нарешті, допомагає у вдосконаленні фізичного, фізико-хімічного та хімічного процесів збагачення вугілля. Ефекти кавітації та акустичного вітру також відповідають за посилення подрібнюваності, суспензійності та ефективності зневоднення вугільної суспензії. Важливо відзначити, що ефект кавітації підвищує температуру середовища для суспензії вугілля під час ультразвукової обробки, і це може вплинути на властивості вугілля, оскільки вугілля чутливе до температури.

Результати експериментів [10] продемонстрували підвищення виходу чистого вугілля з 3% до 10%, більше видобутку чистого вугілля та зменшення вмісту сірки, ртуті, золи та вологи в обробленому вугіллі. Ці результати були пов'язані з ультразвуковими ударними хвилями, що утворюються внаслідок кавітації бульбашок, що відповідає за порушення властивих зв'язків між вугіллям та золеутворюючими мінеральними домішками, та очищенням часток вугілля від домішок. Кавітація також сприяла видаленню небажаних часток глини, шламів та продуктів окислення, що покривають поверхню вугілля.

Застосування згаданих методів є перспективним підходом до підвищення ефективності технологічних процесів збагачення залізородної сировини [11,12].

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності флотажного доведення магнетитових концентратів шляхом дезінтеграції рудних флокулоутворень та очищення поверхні часток. Для досягнення поставлено мети необхідно дослідити особливості формування кавітаційних режимів у залізородній пульпі за допомогою високоенергетичного ультразвуку.

Викладення матеріалу та результати. Моделювання поведінки повітряних бульбашок під дією ультразвукового випромінювання виконано з використанням спеціалізованого програмного пакету «Bubblesim» у середовищі MATLAB [13].

Динаміка розміру повітряних бульбашок у процесі моделювання визначалась на основі модифікованого рівняння Рейля-Плессета [14]

$$\ddot{a}a + \frac{3}{2}\dot{a}^2 + \frac{p_0 + p_l(t)p_l}{\rho} - \frac{a}{\rho c} \dot{p}_l = 0, \quad (1)$$

де a – радіус бульбашки, м; p_0 – гідростатичний тиск, Па; p_l – акустичний тиск, Па; p_l – тиск на поверхні бульбашки, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; c – швидкість звуку, м/с.

Для визначення величини поверхневого тиску бульбашки p_l використано залежність

$$p_l = -4\eta_l \frac{\dot{a}}{a} - (T_2 - T_1) + p_g \left(\frac{a}{a_0} \right)^{3k}, \quad (2)$$

де η_l – коефіцієнт внутрішнього тертя; T_1, T_2 – натяг відповідно внутрішньої і зовнішньої стінок бульбашки; p_g – внутрішній тиск газу бульбашки, Па; k – газова константа політропного процесу.

Результати моделювання у врахуванням нелінійних ефектів високоенергетичного ультразвуку представлено на рис. 1: початковий імпульс (рис. 1а), розсіяний імпульс: (рис. 1б); змінення радіусу бульбашки (рис. 1в).

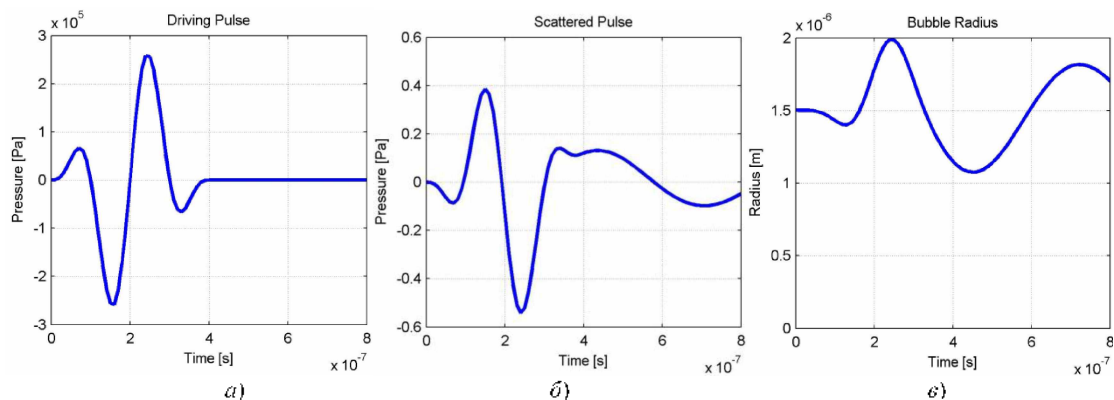


Рис. 1. Моделювання кавітаційних процесів при впливі високоенергетичного ультразвуку: а – початковий імпульс; б – розсіяний імпульс; в – змінення радіусу бульбашки

У процесі дослідження значення амплітуди радіаційного тиску ультразвуку становило 0,3 МПа, водночас частота ультразвуку змінювалась: 1 МГц, 3 МГц, 5 МГц (рис. 1)

Для моделювання процесу поширення ультразвукового сигналу в рідкому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку та зміни щільності використовують метод k -space першого й другого порядку, заснований на системі лінійних рівнянь першого порядку [15–17]. Метод k -space другого порядку можна розглядати як модифікований метод кінцевих різниць, у якому просторовий лапласіан замінюється k -space оператором. Для застосування k -space методу до системи рівнянь першого порядку, що описують поширення хвиль, може бути використаний k -space оператор другого порядку шляхом його розділення на частини, які пов'язані з кожним просторовим напрямком. Для двовимірного випадку ця процедура виконується у такий спосіб

$$\begin{aligned}\frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x} &\equiv F^{-1} \left(ik_x e^{ik_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y} &\equiv F^{-1} \left(ik_y e^{ik_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- x} &\equiv F^{-1} \left(ik_x e^{ik_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- y} &\equiv F^{-1} \left(ik_y e^{ik_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right),\end{aligned}\tag{3}$$

так що

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- x} + \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- y} \right) p(r,t) = \\ = (\nabla^{(c_0 \Delta t)})^2 p(r,t)\end{aligned}\tag{4}$$

Просторово-частотні компоненти k_x і k_y визначено так, що $k^2 = k_x^2 + k_y^2$.

Використання операторів рівняння (3) дозволяє сформулювати k -space метод першого порядку. Застосування експоненціальних коефіцієнтів із рівняння (3) вимагає оцінювання швидкостей ультразвукової хвилі u_x і u_y по точках сітки з інтервалами $\Delta x / 2$ і $\Delta y / 2$ відповідно. Отриманий алгоритм має вигляд

$$\begin{aligned}\frac{u_x(r_1, t^+) - u_x(r_1, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_1)} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x}; \\ \frac{u_y(r_2, t^+) - u_y(r_2, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_2)} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y}; \\ \frac{p(r, t + \Delta t) - p(r, t)}{\Delta t} &= \\ &= -\rho(r) c(r)^2 \left(\frac{\partial u_x(r_1, t^+)}{\partial (c_0 \Delta t)^- x} + \frac{\partial u_y(r_2, t^+)}{\partial (c_0 \Delta t)^- y} \right),\end{aligned}\tag{5}$$

де

$$\begin{aligned}r_1 &\equiv (x + \Delta x / 2, y), \quad r_2 \equiv (x, y + \Delta y / 2), \\ t^+ &\equiv t + \Delta t / 2, \quad t^- \equiv t - \Delta t / 2.\end{aligned}\tag{6}$$

У рівнянні (5) коефіцієнти c_0 і ρ_0 , замінені просторово, змінюються значеннями швидкості звуку й щільності $c(r)$ і $\rho(r)$. Просторове розподілення в рівнянні (5) неявно вводиться в просторові похідні розглянутих операторів. Наприклад, оператори $\partial / \partial (c_0 \Delta t)^+ x$ і $\partial / \partial (c_0 \Delta t)^- x$, що визначаються за формулою (3), відповідають за властивістю зсуву перетворення Фур'є похідним, розрахованим після просторових зрушень $\Delta x / 2$ і $-\Delta x / 2$ відповідно.

Розрахунок потужності високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє підтримувати кавітаційні режими у залізорудній пульпі, здійснювався на основі отриманих вище результатів дослідження поширення фронту ультразвукового імпульсу за допомогою пакета NIFUSimulator [18]. Результати розрахунку наведено на рис. 2.

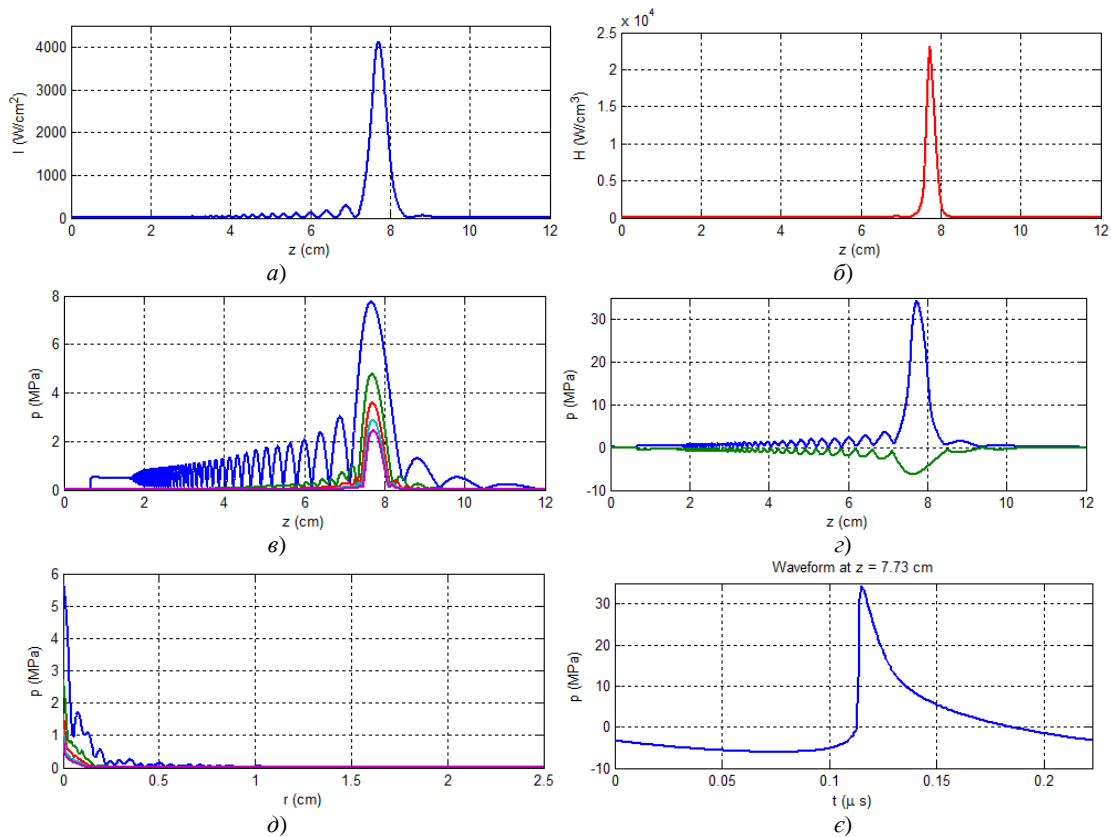


Рис. 2. Дослідження поширення фронту ультразвукового імпульсу за допомогою комп'ютерного моделювання: *a* – радіальна інтенсивність у фокусі ультразвукового випромінювання; *б* – інтенсивність фокусу ультразвукового випромінювання; *в* – осеве розподілення тиску п'яти перших гармонік ультразвукового випромінювання; *г* – осеві піки тиску в ультразвуковому випромінюванні; *д* – розподілення радіального тиску п'яти перших гармонік у фокусі ультразвукового випромінювання; *е* – форма ультразвукової хвилі по осі випромінювання на відстані ($z=7,73$ см), що відповідає піковій інтенсивності

Результати моделювання дозволяють зробити висновок про те, що для підвищення якості очищення часток руди перед флотацією доцільно здійснювати просторовий вплив на залізорудну пульпу високоенергетичного ультразвуку з частотою 20 кГц в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами з частотою від 1 до 5 МГц. Аналіз результатів виконаних досліджень дозволив зробити висновок про те, що для підвищення ефективності процесу флотації шляхом дезінтеграції рудних флокулоутворень доцільно здійснювати просторовий вплив на залізорудну пульпу, який включає комбінацію високоенергетичного ультразвуку та імпульсного магнітного поля спадної напруженості.

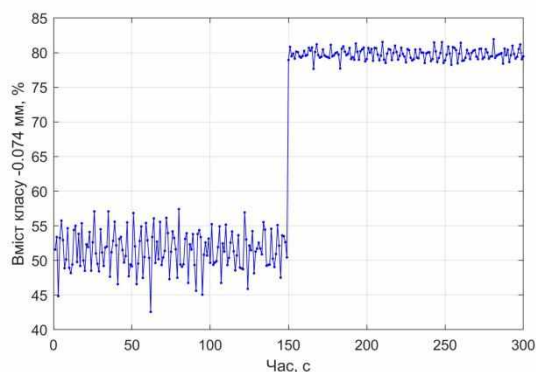


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень використання пристрою розмагнічування часток залізорудної пульпи

На рис. 3 представлено результати експериментальних досліджень використання пристрою розмагнічування часток залізорудної пульпи, одержані із застосуванням ультразвукового гранулометра «Пульсар». Результати вимірювання на інтервалі 0-150 с одержано при вимкненому пристрої, результати вимірювання на інтервалі 151-300 – при увімкненому пристрої розмагнічування пульпи.

Результати моделювання дозволяють зробити висновок про те, що для підвищення якості очищення часток руди перед флотацією доцільно здійснювати просторовий вплив на залізорудну пульпу, який включає комбінацію високоенергетичного ультразвуку з частотою 20 кГц в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами з частотою від 1 до 5 МГц та імпульсного магнітного поля спадної напруженості.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Для підвищення ефективності флотаційного доведення магнетитових концентратів шляхом дезінтеграції рудних флокулоутворень та очищення поверхні часток доцільно застосовувати нелінійні ефекти поля високоенергетичного ультразвуку для формування і підтримання у залізорудній пульпі кавітаційних процесів і акустичних течій. На підставі дослідження закономірностей протікання кавітаційних процесів одержано залежності, які дозволяють визначити оптимальну частоту високоенергетичного ультразвуку для підтримання кавітаційних процесів у залізорудній пульпі в залежності від параметрів її складових. На основі результатів моделювання встановлено, що для підвищення якості очищення часток руди перед флотацією доцільно здійснювати просторовий вплив на залізорудну пульпу, який включає комбінацію високоенергетичного ультразвуку з частотою 20 кГц в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами з частотою від 1 до 5 МГц та імпульсного магнітного поля спадної напруженості.

Список літератури

1. Губин Г. В., Ткач В. В., Равинская В. О. Применение ультразвука для очистки поверхности измененных минеральных частиц перед флотацией. Качество минерального сырья : сб. научн. трудов. 2017. Т. 1. С. 341–349.
2. Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp. Metallurgical and Mining Industry. 2014. Vol. 6(6), P. 8–11.
3. Fornberg B. A. Practical Guide to Pseudospectral Methods. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
4. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7 (4), P. 325–329.
5. Morkun V., Semerikov S., Hryshchenko S., Slovak K. Environmental geo-information technologies as a tool of pre-service mining engineer's training for sustainable development of mining industry. CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 1844, P. 303–310.
6. Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S. Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium, Ind. Eng. Chem. Res. 2011. Vol. 50. 13210–13219.
7. Ambedkar B. Ultrasonic coal-wash for de-ashing and de-sulfurization: experimental investigation and mechanistic modeling, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
8. Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7(7). P. 16–19.
9. Morkun V., Morkun N. Estimation of the crushed ore particles density in the pulp flow based on the dynamic effects of high-energy ultrasound. Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43 (1). P. 61–67.
10. Harrison C.D., Raleigh C.E., Jr., Vujnovic B.J. The use of ultrasound for cleaning coal, in: Proceedings of the 19th Annual International Coal Preparation Exhibition and Conference, Lexington, KY, USA, 2002, P. 61–67.
11. Morkun V., Morkun N., Tron V. Model synthesis of nonlinear nonstationary dynamical systems in concentrating production using Volterra kernel transformation. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7(10), P. 6–9.
12. Morkun V., Morkun N., Tron V. Distributed control of ore beneficiation interrelated processes under parametric uncertainty. Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7(8). P. 18–21.
13. Hoff L., Sontum P. C., Hovem J. M. Oscillations of polymeric microbubbles: Effect of the encapsulating shell. J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 107. P. 2272–2280.
14. Hoff L. Acoustic characterization of contrast agents for medical ultrasound imaging. Dordrecht ; London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
15. Tabei M., Mast T. D., Waag R. C. A k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations. Acoustical Society of America. 2002. Vol. 111 (1), Pt. 1. P. 53–63.
16. Pierce D. Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications, 2nd ed. Acoustical Society of America, Woodbury, NY, 1989.
17. Mast T. D., Souriau L. P., Liu D.-L., Tabei M., Nachman A. I., Waag R. C. A k-space method for large-scale models of wave propagation in tissue. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2001. Vol. 48. P. 341–354.
18. Sonesson J. HIFU Simulator v1.2. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>

Рукопис подано до редакції 03.03.2022