

УДК 66.084+541.182; 628.1; 658.265

Коваль І. З.,

iryna.z.koval@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8154-4154,

к.т.н., доц., доцент кафедри фізичної, аналітичної та загальної хімії,

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Шевчук Л. І.,

lilia.i.shevchuk@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6274-0256, Researcher ID: R-1952-2017,

д.т.н., проф., професор кафедри технології органічних продуктів,

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Бліщ Р. О.,

roksolanaalex1976@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1143-5264, Researcher ID: F-8682-2019,

к.т.н., доц., доцент кафедри технології органічних продуктів,

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів;

доцент кафедри харчових технологій,

Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

ЕФЕКТИВНА ДІЯ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ЗАБРУДНЕНОЇ ВОДИ

Анотація. Традиційні методи очищення води, такі як хімічна коагуляція, адсорбція, хлорування та біологічне очищення, не завжди забезпечують необхідний рівень знезараження і можуть мати негативні побічні ефекти, зокрема утворення токсичних побічних продуктів. Описано результати експериментальних досліджень впливу аргону та гелію (швидкість барботування газів – 0,2 см³/с) через водне середовище (об'ємом 75 см³) та ультразвукової кавітації (22 кГц, 35 Вт) на дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* протягом двох годин. Визначення кількості мікроорганізмів у досліджуваній воді здійснювали за загальною чисельністю колоній на поживному середовищі у чашках Петрі. Встановлено інтенсивне зниження чисельності клітин на початковому етапі процесу при дії аргону та кавітації (61,84% через 30 хв.) за початкової концентрації мікроорганізмів $2,07 \times 10^4$ КУО/см³, що призвело до загибелі понад 98% клітин після години обробки. При дії гелію та кавітації виявлено зниження чисельності *Saccharomyces cerevisiae* вже на початкових етапах процесу: частка загинувших клітин (D_d) становила 40,48% після 30 хв. при вихідному мікробіологічному забрудненні $4,2 \times 10^3$ КУО/см³, а після 90 хвилин обробки концентрація мікроорганізмів знизилася до 100 КУО/см³, що відповідає рівню очищення води понад 97%. Розрахована константа швидкості загибелі клітин для досліджуваних газів вказує на більшу ефективність дії аргону порівняно з гелієм у кавітаційних умовах. Вища ефективність аргону пояснюється його фізико-хімічними властивостями, зокрема нижчою теплопровідністю та потенціалом іонізації, що сприяє інтенсивнішому утворенню кавітаційних бульбашок та активному руйнуванню мікроорганізмів. Отримані результати підтверджують можливість використання комбінованої дії ультразвуку та інертних газів для ефективного знезараження води та її подальшого скидання у природні водойми. Наступні дослідження в цьому напрямі можуть бути зосереджені на оптимізації параметрів кавітаційної обробки, а саме: дослідження впливу змінної частоти ультразвукової кавітації на різні типи мікроорганізмів та визначення оптимального співвідношення потужності ультразвуку, тривалості обробки та швидкості барботування газу.

Ключові слова: кавітація, аргон, гелій, вода, дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*.

Koval I. Z.,

iryna.z.koval@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8154-4154,

Ph.D, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Physical, Analytical and General Chemistry,

Lviv Polytechnic National University, Lviv

Shevchuk L. I.,

lilia.i.shevchuk@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6274-0256,

Researcher ID: R-1952-2017,

Doctor of Engineering, Professor, Professor at the Department of Organic Products Technology,

Lviv Polytechnic National University, Lviv

Blishch R. O.,

roksolanaalex1976@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1143-5264, Researcher ID: F-8682-2019,

Ph.D, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University;

Associate Professor at the Department of Food Technologies,

Lviv University of Trade and Economics, Lviv

EFFECTIVE ACTION OF CAVITATION TREATMENT OF CONTAMINATED WATER

Abstract. Traditional water treatment methods, such as chemical coagulation, adsorption, chlorination, and biological treatment, do not always provide the necessary level of disinfection and can have negative side effects, including the formation of toxic byproducts. The results of experimental studies on the effect of argon and helium (gas bubbling rate – $0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$) through a water medium (volume of 75 cm^3) and ultrasonic cavitation (22 kHz, 35 W) on *Saccharomyces cerevisiae* yeast over a two-hour period are described. The number of microorganisms in the studied water was determined based on the total number of colonies grown on nutrient media in Petri dishes. A significant reduction in cell count was observed at the initial stage of the process under the action of argon and cavitation (61.84% after 30 min) at an initial microbial contamination of $2.07 \times 10^4 \text{ CFU/cm}^3$, leading to the elimination of over 98% of the cells after one hour of treatment. Under the influence of helium and cavitation, a reduction in *Saccharomyces cerevisiae* was also observed in the early stages of the process: the fraction of dead cells (Dd) reached 40.48% after 30 min at an initial microbial contamination of $4.2 \times 10^3 \text{ CFU/cm}^3$. After 90 minutes of treatment, the microorganism concentration decreased to 100 CFU/cm^3 , corresponding to a water purification level of over 97%. The calculated rate constant of cells destruction for the studied gases indicates the higher efficiency of argon compared to helium under cavitation conditions. The greater effectiveness of argon is explained by its physicochemical properties, particularly its lower thermal conductivity and ionization potential, which promote more intense cavitation bubble formation and active microbial destruction. The obtained results confirm the feasibility of using the combined action of ultrasound and inert gases for effective water disinfection and its subsequent discharge into natural water bodies. Further research in this area may focus on optimizing the parameters of cavitation treatment, specifically investigating the effect of variable-frequency ultrasonic cavitation on different types of microorganisms and determining the optimal balance between ultrasound power, treatment duration, and gas sparging rate.

Key words: cavitation, argon, helium, water, *Saccharomyces cerevisiae* yeast.

JEL Classification: M01, L23, I19

DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2025-42-07>

Постановка проблеми. Забруднення водних ресурсів є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності. Основними джерелами забруднення є скиди промислових і побутових стічних вод, які містять широкий спектр хімічних і біологічних домішок, зокрема важкі метали, нафтопродукти, пестициди, органічні

сполуки, бактерії, віруси, гриби та водорості. Традиційні методи очищення води, такі як хімічна коагуляція, адсорбція, хлорування та біологічне очищення, не завжди забезпечують необхідний рівень знезараження і можуть мати негативні побічні ефекти, зокрема утворення токсичних побічних продуктів.

Одним із перспективних методів знезараження води є використання кавітаційної обробки, яка сприяє руйнуванню клітинних структур мікроорганізмів, окисненню органічних забруднювачів та покращенню якості очищеної води.

Попри численні дослідження впливу кавітації на різні види мікроорганізмів залишається низка не вирішених питань. Зокрема, недостатньо вивчено вплив кавітаційного процесу в поєднанні з різними газами на ефективність знезараження води, а також можливість оптимізації параметрів обробки для досягнення максимального ефекту. Вплив інертних газів на життєздатність мікроорганізмів у кавітаційних умовах становить значний науковий інтерес через їхню хімічну інертність. Адже барботування газу в реакційне середовище сприяє пришвидшенню руйнівної дії кавітації на мікроорганізми [1].

Таким чином, актуальність дослідження ефективності кавітаційної обробки забрудненої води обумовлена необхідністю пошуку інноваційних і екологічно безпечних методів водоочищення, що забезпечують високу ефективність при мінімальних витратах ресурсів.

Об'єкт дослідження – інфікована вода клітинами дріжджів.

Предмет дослідження – кавітаційна обробка води з вмістом дріжджових клітин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел засвідчує, що дослідження кавітаційного впливу на різні мікроорганізми активно проводяться як у вітчизняних, так і в зарубіжних наукових роботах.

Кавітаційна обробка демонструє позитивні результати у знезараженні води, що підтверджується численними науковими публікаціями [2, 3–7]. Основними біооб'єктами досліджень у цій галузі є бактеріальні забрудники [3, 6, 8, 9], проте недостатньо вивчено процеси очищення води від дріжджів.

Відомо, що ультразвукова кавітація ефективно впливає на водорості, гриби та бактерії [3–7]. В роботі [6] описано зміну структури мікроорганізмів під дією кавітації в процесі дезінфекції стічних вод. Робота [9] демонструє ефективне руйнування бактерій *Bacillus cereus* в атмосфері аргону ($k_d = (2,3 \pm 0,1) \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) порівняно з гелієм ($k_d = (8,16 \pm 0,07) \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) незалежно від початкової концентрації бактерій у воді. Враховуючи ефективність інертних газів у процесі руйнування мікроорганізмів, доцільно дослідити його вплив на дріжджові клітини в поєднанні з кавітаційним процесом. Дріжджі відрізняються за структурою

від бактерій, і дані щодо впливу інертних газів у кавітаційних умовах на дріжджі в доступній літературі практично відсутні.

Постановка завдання. *Мета дослідження* – дослідити комбінований вплив ультразвукової кавітації та інертних газів на життєздатність дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* у водному середовищі. Визначити динаміку змін чисельності клітин під час кавітаційної обробки в умовах різних газових атмосфер.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Матеріали та методи досліджень.* У дослідженні використовували дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*, виділені з відпрацьованої води пивоварного виробництва. Чисті культури дріжджів вирощували в лабораторних умовах при температурі 30 °C протягом 96 годин на сусло-агарі, а потім зберігали при 4 °C. Для експериментів готували суспензію дріжджових клітин у стерильній воді, додаючи чисту культуру мікроорганізмів до стерильної природної води. Початкова концентрація мікроорганізмів у воді становила $2,07 \times 10^4 \text{ КУО/см}^3$.

Експерименти проводили при температурі $298 \pm 1 \text{ K}$ і тиску 0,1 МПа протягом 2 годин. Кавітацію створювали за допомогою ультразвукового генератора УЗДН-2Т з частотою 22 кГц і потужністю 35 Вт.

Для барботування реакційного середовища використовували аргон, інертний газ, який показав високу ефективність у видаленні бактерій із води в попередніх дослідженнях [1]. Досліджувану воду наливали в скляний реактор об'ємом 75 см³, який постійно охолоджувався проточною водою для підтримки стабільної температури ($298 \pm 1 \text{ K}$). Ультразвукові коливання передавалися в зразок води за допомогою магнітострикційного випромінювача, зануреного в реактор. Одночасно з увімкненням ультразвукового генератора подавали аргон зі швидкістю 0,2 см³/с, загальний об'єм газу склав 1,4 дм³. Протягом експерименту кожні 30 хвилин відбирали проби води для аналізу. Кожен експеримент повторювали тричі, а результати обробляли статистично, розраховуючи середнє арифметичне.

Концентрацію мікроорганізмів до і після експериментів визначали шляхом підрахунку колоній, що виросли на сусло-агарі в чашках Петрі.

Результати досліджень та їх обговорення.

Воду з початковою концентрацією дріжджів $2,07 \times 10^4 \text{ КУО/см}^3$ обробляли одночасно аргонem та ультразвуком. Зміну числа мікроорганізмів (ЧМ) протягом обробки представлено в таблиці

1. Згідно з табличними даними через 1800 секунд обробки ЧМ зменшилася в 2,6 рази, а через годину – в 51,8 разів.

Графік показує швидке зростання кількості загиблих клітин протягом першої години обробки. Після 1800 секунд обробки ЧМ значно зменшилася, і частка загиблих клітин склала 61,84%, а через годину – вже 98,07%. Після години обробки крива практично не змінюється (рис. 1).

Кінцева концентрація мікроорганізмів не перевищує 100 КУО/см³, а розрахований рівень знищення мікроорганізмів (D_d) після двох годин обробки склав 99,52%. Ці результати засвідчили практично повне очищення води та високу ефективність обробки аргонном в умовах кавітації. Для порівняння при обробці води з підвищеним вмістом спороутворюючих бактерій роду *Bacillus cereus* (початкова концентрація $1,77 \times 10^4$ КУО/см³) в аналогічних умовах відсоток їх загибелі склав 85,15% [9].

Дослідження впливу гелію на життєдіяльність мікроорганізмів у кавітаційному середовищі проводили з використанням дріжджів при концентрації $4,2 \times 10^3$ КУО/см³. Зміни кількості живих клітин залежно від тривалості обробки представлені в таблиці 2, згідно з якою після години обробки (3600 секунд) кількість живих клітин зменшилася в 8,4 рази, а після півтори години (5400 секунд) – в 42 рази порівняно з початковим мікробним навантаженням. Було досягнуто показника ЧМ = 100 КУО/см³, що відповідає стандартам питної води. Подальша обробка в атмосфері гелію підтвердила ефективність методу.

Рисунок 2 показує швидке зростання частки загиблих клітин протягом першої години обробки. Після 3600 секунд обробки частка загиблих клітин становить 88,09%, а після 5400 секунд – 97,62%. Після 5400 секунд обробки гелієм в умовах кавітації крива частки загиблих клітин набуває лінійного вигляду та не змінюється.

Таблиця 1

Життєздатність клітин *Saccharomyces cerevisiae* за різних режимів обробки в умовах Ar/УЗ обробки

Тривалість Ar/УЗ обробки, с	ЧМ, КУО/см ³
0	$2,07 \cdot 10^4$
1800	$7,9 \cdot 10^3$
3600	$4 \cdot 10^2$
5400	$3 \cdot 10^2$
7200	$1 \cdot 10^2$

Таблиця 2

Життєздатність клітин *Saccharomyces cerevisiae* за різних режимів обробки в умовах He/УЗ обробки

Тривалість He/УЗ обробки, с	ЧМ, КУО/см ³
0	$4,2 \cdot 10^3$
1800	$2,5 \cdot 10^3$
3600	$5 \cdot 10^2$
5400	$1 \cdot 10^2$
7200	$1 \cdot 10^2$

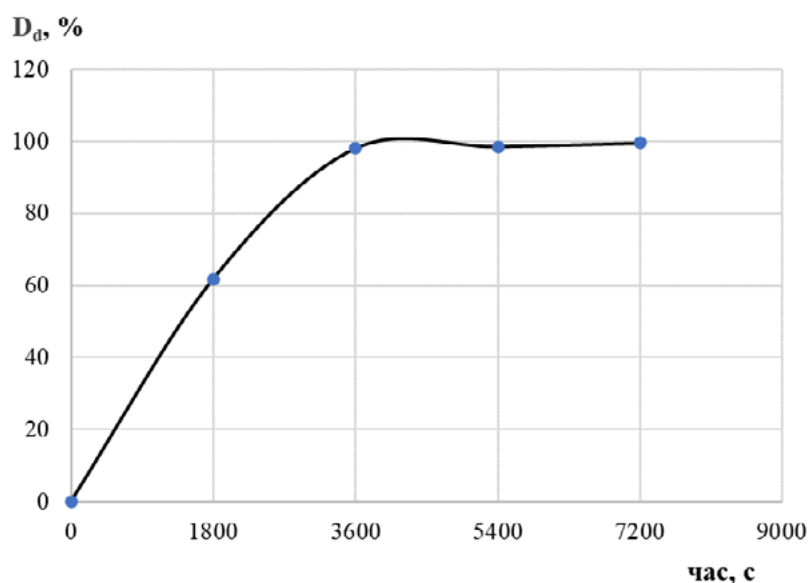


Рис. 1. Залежність частки загиблих клітин від тривалості одночасної дії аргону і кавітації

Кінцева концентрація мікроорганізмів не перевищує 100 КУО/см³, що було досягнуто за 1,5 години. Розрахована ефективна константа швидкості загибелі дріжджів (k_d) становить $5,73 \pm 0,08 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. Ці результати свідчать про майже повне очищення води та високу ефективність обробки гелієм у кавітаційному середовищі. Для порівняння при обробці води з спороутворюючими бактеріями *Bacillus cereus* в аналогічних умовах k_d становить $2,89 \pm 0,04 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ [9].

Якщо порівняти ефективність знезараження води від дріжджів між дією аргону та гелію в кавітаційних умовах, то при застосуванні аргону виявлено більшу ефективність.

Таким чином, використання аргону в умовах кавітації дозволило досягнути майже повного видалення дріжджів із води. Висока ефективність аргону пояснюється його властивостями: він забезпечує більший вихід продуктів піролізу [1] через нижчу теплопровідність порівняно з гелієм. Це означає, що насичення води аргонном призводить до утворення більшої кількості кавітаційних бульбашок, що сприяє активному руйнуванню мікроорганізмів. Крім того, аргон має нижчий потенціал іонізації (15,7 еВ) порівняно з гелієм (24,5 еВ), що полегшує електронний пробій у кавітаційних бульбашках і сприяє більш інтенсивному розпаду молекул води, підвищуючи ефективність знезараження.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Проведено дослідження життєздатності дріжджів за умов кавітаційного впливу та барботування аргону і гелію у водній системі. Виконано розрахунок і порівняння частки загиблих клітин під час двогодинної обробки забрудненої дріжджами води за різних режимів впливу. Встановлено зниження мікробіологічного забруднення води на два порядки (з $2,07 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^2$ КУО/см³) за умов аргон/кавітація, що підтверджує можливість скидання очищеної води у відкриті водойми. Графічно відображено зміну чисельності клітин від часу обробки води в умовах проведення експериментів.

Зафіксовано високий відсоток зруйнованих дріжджових клітин *Saccharomyces cerevisiae* у водному середовищі ($D_d = 99,5\%$ – після барботування аргонном та $D_d = 97,62\%$ – гелієм), що свідчить про високу ефективність комбінованого

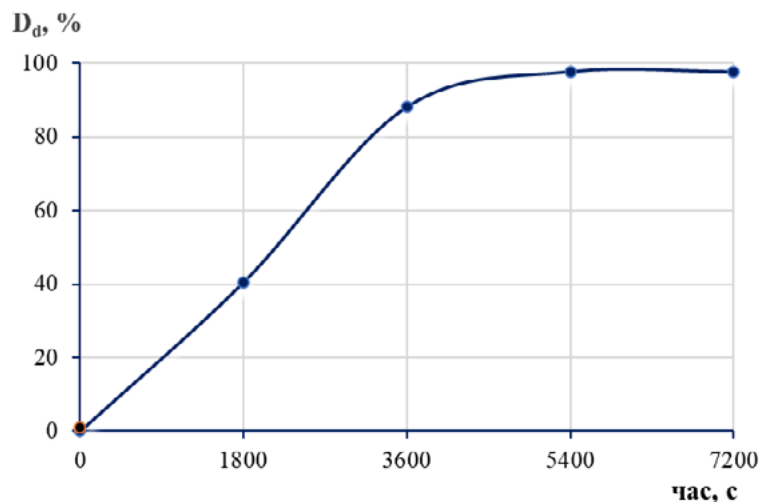


Рис. 2. Залежність частки загиблих клітин від тривалості одночасної дії гелію та кавітації

впливу інертних газів та ультразвуку в процесах очищення води. Пояснено більшу ефективність руйнування дріжджів в умовах Ar/кавітація порівняно з He/кавітація.

ЛІТЕРАТУРА

1. Naddeo V., Cesaro A., Mantzavinis D. Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation – a critical review. *Global Nest Journal*. 2014. Vol. 16, No 3. P. 561–577.
2. Dai Ch., Xiong F., He R., Zhang W. Effects of low-intensity ultrasound on the growth, cell membrane permeability and ethanol tolerance of *Saccharomyces cerevisiae*. *Ultrasonics Sonochem*. 2017. Vol. 36. P. 191–197. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.035
3. Iorio M. C., Bevilacqua A., Corbo M. R. A case study on the use of ultrasound for the inhibition of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in almond milk. *Ultrasonics Sonochem*. 2019. Vol. 52. P. 477–483.
4. Kong Y., Peng Y., Zhang Zh. Removal of *Microcystis aeruginosa* by ultrasound: Inactivation mechanism and release of algal organic matter. *Ultrasonics Sonochem*. 2019. Vol. 56. P. 447–457.
5. Li Y., Shi X., Zhang Zh. Enhanced coagulation by high-frequency ultrasound in *Microcystis aeruginosa* – laden water: Strategies and mechanisms. *Ultrasonics Sonochem*. 2019. Vol. 55. P. 232–242.
6. Luhovskyi O. F., Gryshko I. A., Bernyk I. M. Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2018. Vol. 40. P. 95–101.
7. Park J., Son Y., Lee W. H. Variation of efficiencies and limits of ultrasonication for practical algal bloom control in fields. *Ultrasonics Sonochem*. 2019. Vol. 55. P. 8–17.

8. Chaudhry F. N., Malik M. F. *Factors affecting water pollution: a review. J. Ecosyst. Ecography.* 2017. Vol. 7, No 1. P. 225–231.

9. Коваль І. З. Життєздатність спорогенних бактерій в атмосфері інертних газів. *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи).* 2020. Т. 12, Вип. 1. С. 8–13. <https://doi.org/10.31861/biosystents.2020.01.008>.

REFERENCES

1. Naddeo V., Cesaro A. and Mantzavinos D. (2014), Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation – a critical review. *Global Nest Journal*, Vol. 16, No 3, p. 561–577.

2. Dai Ch., Xiong F., He R. and Zhang W. (2017), Effects of low-intensity ultrasound on the growth, cell membrane permeability and ethanol tolerance of *Saccharomyces cerevisiae*. *Ultrasonics Sonochem.*, Vol. 36, p. 191–197. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.035.

3. Iorio, M. C., Bevilacqua A. and Corbo, M. R. (2019), A case study on the use of ultrasound for the inhibition of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in almond milk. *Ultrasonics Sonochem.*, Vol. 52, p. 477–483.

4. Kong Y., Peng Y. and Zhang Zh. (2019), Removal of *Microcystis aeruginosa* by ultrasound: Inactivation

mechanism and release of algal organic matter. *Ultrasonics Sonochem.*, Vol. 56, p. 447–457.

5. Li Y., Shi X. and Zhang Zh. (2019), Enhanced coagulation by high-frequency ultrasound in *Microcystis aeruginosa* – laden water: Strategies and mechanisms. *Ultrasonics Sonochem.*, Vol. 55, p. 232–242.

6. Luhovskyi, O. F., Gryshko, I. A. and Bernyk, I. M. (2018), Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. *Journal of Water Chemistry and Technology*, Vol. 40, p. 95–101.

7. Park J., Son Y. and Lee, W. H. (2019), Variation of efficiencies and limits of ultrasonication for practical algal bloom control in fields. *Ultrasonics Sonochem.*, Vol. 55, p. 8–17.

8. Chaudhry, F. N. and Malik, M. F. (2017), Factors affecting water pollution: a review. *J. Ecosyst. Ecography*, Vol. 7, No 1, p. 225–231.

9. Koval, I. Zh. (2020), Zhyttiezdatnist sporohenykh bakterii v atmosferi inertnykh haziv. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu. Biolohiia (Biolohichni systemy)*, T. 12, vyp. 1, s. 8–13. <https://doi.org/10.31861/biosystents2020.01.008>.

Стаття надійшла до редакції

11 квітня 2025 року