

УДК (UDC) 66.084+541.182; 628.1; 658.265

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-07>

І. З. КОВАЛЬ, канд. техн. наук, доц.
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

e-mail: irynazk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8154-4154>

ВПЛИВ КИСНЮ ТА ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД БАКТЕРІЙ ТА ДРІЖДЖІВ В КАВІТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Мета. Дослідити процес очищення води з вмістом бактерії роду *Bacillus cereus* та дріжджів роду *Saccharomyces cerevisiae* в умовах кавітації та атмосфері газів різної природи (кисню та вуглекислого газу). Оцінити та порівняти ефективність руйнування бактеріальних клітин з дріжджовими, а також визначити ефективну природу газу під час кавітаційної обробки водної системи.

Методи. Досліджувані модельні середовища озвучувались дією ультразвукового генератора (УЗДН-2Т) з частотою 22 кГц, потужністю 35 Вт. Газовими бульбашками слугували кисень і вуглекислий газ як додаткові зародки кавітації. Кількість мікроорганізмів до і після озвучування визначалась шляхом підрахунку колоній, які виростили на поживному середовищі в чашці Петрі і виражалась в колоній-утворюючих одиницях (КУО).

Результати. Представлені результати морфологічних ознак бактерій і дріжджів, а також знімки клітин за результатами мікроскопічних досліджень при відповідному збільшенні, характерному для конкретного роду мікроорганізмів. Обчислені ступені руйнування мікроорганізмів, виражених у відсотках. За результатами досліджень руйнуванню швидше піддавались бактерії роду *Bacillus cereus*, порівняно з дріжджами роду *Saccharomyces cerevisiae* в умовах одночасної дії газу та кавітації. Резистентність дріжджових клітин МО пояснюється результатом специфічного впливу кавітації на клітинну стінку дріжджів та їх міжгенетичної різниці в структурах стінки клітин. Експериментально показано більшу ефективність дії кисню в процесах кавітаційної обробки як бактерій, так і дріжджів, порівняно з дією вуглекислого газу.

Висновки. Відзначено активніше руйнування бактеріальних клітин, порівняно з дріжджовими в умовах газ/кавітація. Досліджено, що кисень в кавітаційних умовах описується більшою величиною ступеня руйнування мікроорганізмів, що пояснюється природою дії самого газу в умовах експерименту. Показано, що ефективність очищення води від мікроорганізмів залежить від природи барботованого газу в кавітаційних умовах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кавітація, знезараження води, бактерії, дріжджі, кисень, вуглекислий газ

Koval I.Z.

Lviv Polytechnic National University

INFLUENCE OF OXYGEN AND CARBON DIOXIDE ON WATER PURIFICATION FROM BACTERIA AND YEAST UNDER CAVITATION CONDITIONS

Purpose is to study the purification process of water polluted by containing *Bacillus cereus* bacteria type and *Saccharomyces cerevisiae* yeast type under cavitation conditions and atmosphere of different gases nature (oxygen and carbon dioxide); to evaluate and to compare the destruction efficiency of bacterial with yeast cells, and to determine the effective gas nature during cavitation treatment of the aqueous system.

Methods. The investigated model media were sounded by the action of an ultrasonic generator (UZDN-2T) with a frequency of 22 kHz, with a power of 35 watts. Oxygen and carbon dioxide were gas bubbles as an additional embryos of cavitation. Microorganisms number before and after sonication was determined by counting of the colonies grown on the nutrient medium in a Petri dish and expressed in colony-forming units (CFU).

Results. The results of the morphological characteristics of bacteria and yeast, as well as images of cells according to the results of microscopic studies at a corresponding magnification characteristic of a particular

© Коваль І. З., 2020



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

microorganisms types are presented. Degrees of microorganisms destruction, expressed in a percentage, were calculated. According to the results of studies, *Bacillus cereus* bacteria type were more likely to be destroyed, compared with *Saccharomyces cerevisiae* yeast type at the conditions of simultaneous action of gas and cavitation. The resistance of yeast cells is explained by the result of the specific effect of cavitation on the yeast cell wall and their inter-genetic difference in cell wall structures. Higher efficiency of oxygen in the processes of cavitation treatment of both bacteria and yeast, compared to the action of carbon dioxide is shown experimentally.

Conclusions. More active destruction of bacterial cells compared to yeast in the gas/cavitation conditions shown that is explained by the age-related signs of the bacteria. It has been investigated that oxygen under cavitation conditions is described by a larger value of the microorganisms destruction, that is explained by the nature of the gas action at the experimental conditions. It is shown that the efficiency of water purification from microorganisms depends on the nature of the gas bubbled under cavitation conditions.

KEYWORDS: cavitation, water disinfection, bacteria, yeast, oxygen, carbon dioxide

Коваль И.З.

Национальный университет "Львовская политехника"

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ОЧИСТКУ ВОДЫ ОТ БАКТЕРИЙ И ДРОЖЖЕЙ В КАВИТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Цель. Исследовать процесс очистки воды с содержанием бактерий рода *Bacillus cereus* и дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* в условиях кавитации и атмосфере газов различной природы (кислорода и углекислого газа). Оценить и сравнить эффективность разрушения бактериальных клеток с дрожжевыми, а также определить эффективную природу газа при кавитационной обработки водной системы.

Методы. Озвучивание осуществляли ультразвуковым генератором (УЗДН-2Т) при 22 кГц и 35 Вт с одновременным барботированием кислорода и углекислого газа. Количество микроорганизмов до и после озвучивания определялась подсчетом колоний и выражалась в колонии-образующих единицах (КОЕ).

Результаты. Представлены результаты морфологических признаков бактерий и дрожжей, а также снимки клеток по результатам микроскопических исследований при соответствующем увеличении, характерном для конкретного рода микроорганизмов. Вычисленные степени разрушения микроорганизмов, выражены в процентах. По результатам исследований разрушению быстрее подвергались бактерии рода *Bacillus cereus*, по сравнению с дрожжами рода *Saccharomyces cerevisiae* в условиях одновременного действия газа и кавитации. Резистентность дрожжевых клеток МО объясняется результатом специфического воздействия кавитации на клеточную стенку дрожжей и их меж генетической разницы в структурах стенки клеток. Экспериментально показано большую эффективность действия кислорода в процессах кавитационной обработки как бактерий, так и дрожжей по сравнению с действием углекислого газа.

Выводы. Отмечено активнее разрушения бактериальных клеток по сравнению с дрожжевыми в условиях газ/кавитация. Действие кислорода в кавитационных условиях описывается большей величиной степени разрушения микроорганизмов. Показано, что эффективность очистки воды от микроорганизмов зависит от природы барботованного газа в кавитационных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кавитация, обеззараживания воды, бактерии, дрожжи, кислород, углекислый газ

Вступ

Забруднення поверхневих вод є результатом антропогенної діяльності людини, що пов'язано з прогресивним розвитком промисловості, сільського господарства, транспорту, енергетики тощо. Все це веде до глобального характеру, якого набирає антропогенний вплив на навколишнє середовище. Зараз в нашій країні спостерігаються ускладнення із забезпеченням природними ресурсами внаслідок якісного та кількісного виснаження природних водоймищ, що пов'язано з забрудненням та нерациональним використанням води. Забруднення води здебільшого відбувається внаслідок скиду до неї промислових, побуто-

вих та сільськогосподарських відходів. В деяких водоймищах забруднення води настільки велике, що відбулася повна їх деградація як джерел водопостачання [1]. Забруднюючі речовини змінюють якісний склад води, що в основному виявляється в змінах її фізичних властивостей, зокрема, появі неприємних запахів, присмаків, поява сторонніх речовин на поверхні води з наступним їх відкладанням на дно водойм.

Виробничі стічні води (СВ) забруднені в основному відходами і викидами виробництва. Кількісна і якісна різноманітність забруднювачів залежить від галузі промисловості, її технологічних процесів. Скидан-

ня забруднених виробничих СВ у відкриті водойми веде до зростання концентрації забруднювачів як хімічного, так і біологічного походження. Так, результатом промислової діяльності Кривбасу (без врахування побутових стоків) є щорічне надходження до гідросистеми річки Інгулець понад 120 млн.м³ неочищених або недостатньо очищених СВ, що складає 45-55% природного середньорічного стоку [2].

Невтішними є результати й мікробіологічних досліджень. Так, санітарно-біологічні дослідження [3] якості СВ міст Лубни, Кременчук, Світловодськ, Кіровоград засвідчують їх низький ступінь очищення після скидання води з очисних споруд у басейн річки Дніпра. Так, в окремих випадках у пробах СВ в містах Лубни та Кременчук виявлено яйця гельмінтів (1-4 екз./дм³) та значні величини індексу лактозопозитивних кишкових паличок [3]. Повідомляється [4], що 0,001 см³ води може містити до 10⁹ бактерій. В 1 см³ стічних і річкових водах їх кількість може досягати декілька мільйонів, а в 1г ґрунту – декілька мільярдів. Об'єм бактеріальної маси при кількості 100 млн. бактерій в 1 см³ складає 0,04% від об'єму СВ.

Вибір способу очищення води вимагає глибоких досліджень і вивчень різних видів забрудників води, їх концентрації тощо. Забруднення води біологічного походження вважається більш небезпечним від хімічного. Тому, на сьогоднішній день науковці пропонують безліч ефективних методів знезараження води, одним з яких є застосування кавітаційної дії на водну систему. Знайдено багато наукових робіт, присвячених дослідженню дії УЗ кавітації в процесах знезараження води від різних мікроорганізмів (МО): *E. coli* [5, 6], *Staphylococcus aureus* [5], *Microcystis aeruginosa* [7, 8, 9], водорості [10], *Listeria monocytogenes* [6], *Geobacillus* [11], *Anoxybacillus flavi-*

thermus [11], *Enterococcus avium* [12] та інші [13-15].

В [5] досліджено інактивацію кишкової палички *E. coli* та золотистого стафілокока *Staphylococcus aureus* в присутності ультразвукової дії: $3,02 \pm 0,52 \log$ та $0,18 \pm 0,14 \log$, відповідно. Інактивацію *Microcystis aeruginosa* як наслідок механічних та хімічних впливів, викликаних ультразвуком [7, 8], засвідчили результати цитометрії клітини (зменшення розмірів, внутрішньої зернистості, цілісності та активності клітин водоростей) [7], систематичний аналіз морфології клітин водоростей з ефективністю видалення водоростей 80-90% [8] та вплив інтенсивності ультразвукової кавітації на структуру мікроорганізмів при дезінфекції СВ [15]. Зниження кількості водоростей на 80% в об'ємі 100 л води досягнуто при частоті ультразвуку 36 кГц та потужності 650 Вт протягом 10 хвилин та на 50-90% при 36-175 кГц (потужність 650 Вт) в об'ємі 4 м³ тривалістю обробки 60 хв. Використання ультразвукової технології для запобігання утворенню біоплівки в реальних обставинах, що виникають у промислових умовах описано в [13] та надано рекомендації щодо побудови ультразвукових кавітаторів [15], які забезпечують високий рівень інтенсивності ультразвукових коливань у об'ємі рідини.

Однак, експериментальних публікацій щодо руйнування *Bacillus* та *Sacch. cerevisiae* в умовах кавітації при барботуванні кисню та вуглекислого газу практично не знайдено. Тому в представленій роботі пропонується розглянути процес очищення води від забруднень біологічного походження, що полягає в руйнуванні мікроорганізмів (МО) конкретного роду при одночасній дії кавітації та барботованого газу.

Методика дослідження

Джерелом ультразвукових хвиль слугував УЗДН-2Т генератор з частотою 22 кГц, потужністю 35 Вт. Об'єм досліджуваної дисперсії ($V = 75 \text{ см}^3$) в скляному реакторі охолоджувався водопровідною водою протягом всього процесу. В якості додаткових газових бульбашок застосовані були кисень і вуглекислий газ. Газ барботували у воду впродовж всього процесу кавітаційного її

оброблення зі швидкістю 0,2 см³/с. Витрата газу становила 0,7 дм³/год.

Для дослідження дії газ/кавітація були використані дві монокультури – бактерії роду *Bacillus* та дріжджі роду *Saccharomyces*. Чисті культури вказаних МО були внесені з дотриманням умов стерильності до води, взятої з відкритої водойми в таких кількостях, щоб максимально наблизитись

до реальної концентрації забруднення вод з відкритих водойм. Вода з відкритої водойми була стерильною, тобто досліджувалась дія газу та кавітації на конкретно взяті клітини мікроорганізмів.

Створювались окремі модельні середовища в результаті додавання до води з відкритої водойми чистих монокультур: бактерій роду *Bacillus cereus* та дріжджів роду *Saccharomyces cerevisiae*. Модельні води створювали з метою наближення за якісним та кількісним складом до реального рівня мікробіологічного забруднення виробничих СВ (10^3 - 10^4 КУО/см³). Створені модельні води піддавались дії кавітації впродовж двох годин (t=7200 с) при T=298±1К. Підрахунок клітин до і після обробки виражений в колонійутворюючих одиницях (КУО), які вирости на поживному середовищі на чашках Петрі. Підрахунок числа мікроорганізмів

(ЧМ) в 1 см³ досліджуваної води полягає у визначенні загальної кількості МО, які мають здатність рости на м'ясо-пептонному агарі (МПА) (для бактерій) або сусло-агарі (СА) (для дріжджів) на чашках Петрі при температурі 35±0,5°C впродовж 48±2 год. Далі необхідно підрахувати кількість колоній, що вирости на поживному середовищі. Тому, для швидкого підрахунку загальної кількості колоній (X) визначалось їх число в 1 см² (m), з врахуванням площі чашки Петрі:

$$S = \pi r^2, \quad (1)$$

де r – радіус чашки, тоді:

$$S = m \pi r^2 \quad (2)$$

Експериментальні точки діаграми в нижче представлених експериментальних матеріалах отримані за середньоарифметичними даними трьох-чотирьох паралельних висівів зразків води.

Результати досліджень

Досліджувані МО відносяться до різних груп: паличкоподібні бактерії та овальні дріжджоподібні грибки (табл. 1). Серед об'єктів досліджуваних МО присутні як прокаріоти, так і еукаріоти, тобто розглядаються різні види мікробіологічних об'єктів.

Для досліджень були використані молоді клітини бактерій, тобто 1-добові бактерії роду *Bacillus cereus*, ще до стадії утворення ендоспор (рис.1a) та дріжджові клітини (рис.1б). Результати морфологічних властивостей і ознак МО представлено в таблиці 2.

Таблиця 1

Характеристика мікроорганізмів

Бактерії	
<i>Bacillus cereus</i>	паличкоподібні бактерії; аспорогенні (1-добові); належать до родини <i>Bacillaceae</i>
Дріжджі	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	хлібопекарські дріжджі; нерухомі; належать до родини <i>Saccharomycetaceae</i>

Таблиця 2

Морфологічні особливості мікрооб'єктів

Досліджувані мікрооб'єкти	Морфологічні ознаки		
	Забарвлення за Грамом	Ширина, мкм	Довжина, мкм
<i>Bacillus cereus</i>	Грам +	1,3	3,42
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Грам +	5,17	8,67

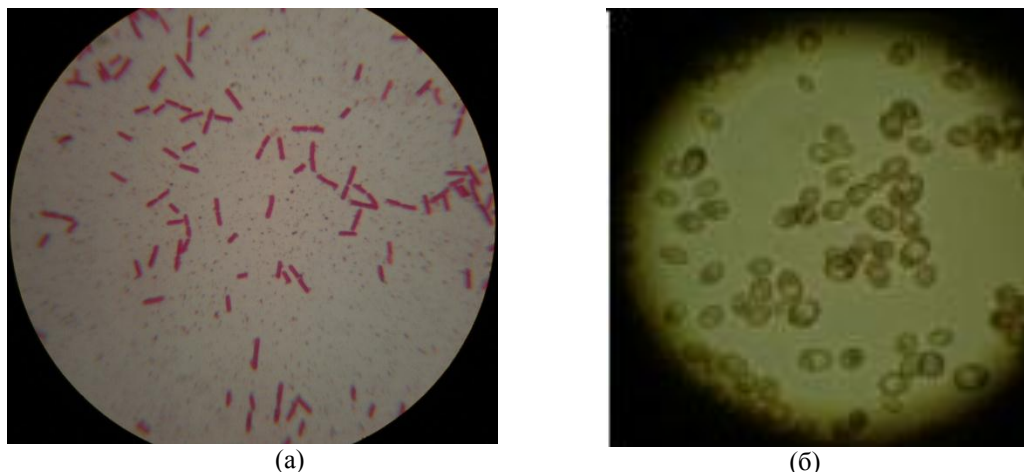


Рис. 1 – Знімки клітин мікроорганізмів при мікроскопічних дослідженнях.
Збільшення: 1200 (а) та 480 (б)

Розрахований ступінь руйнування мікроорганізмів (D_d) після обробки газу/УЗ, що дорівнює відношенню числа мікроорганізмів (ЧМ) відносно початкового числа мікроорганізмів ($ЧМ_0$), вираженого у відсотках (табл. 3). Процеси руйнування бактерій

і дріжджів в умовах експериментів представлено на рис. 2 і 3, які дозволяють оцінити і порівняти ефективність руйнування досліджених МО в присутності кисню з вуглекислим газом.

Таблиця 3

Ступінь руйнування мікроорганізмів

Мікроорганізми	Ступінь руйнування (D_d) після $t = 7200$ с, %	
	$O_2/УЗ$	$CO_2/УЗ$
Бактерії		
<i>Bacillus cereus</i>	88,6	82,9
Дріжджі		
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	80,77	80,0

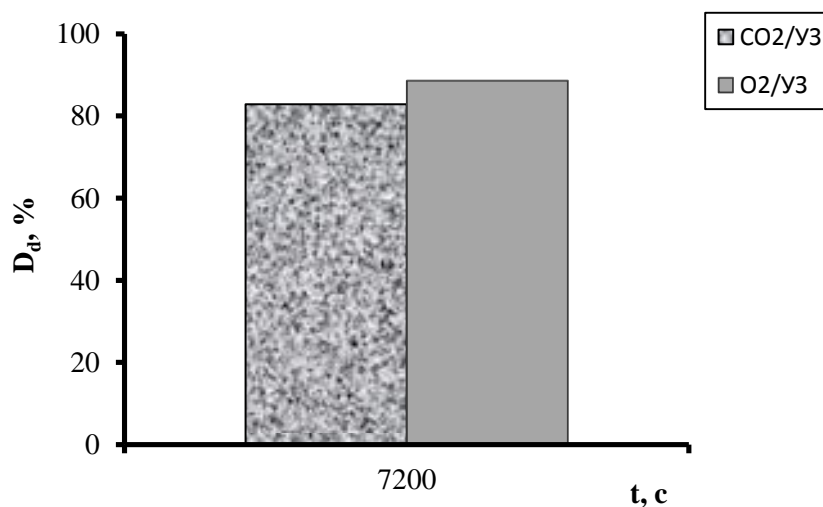


Рис. 2 – Залежність величини D_d для бактерій *Bacillus cereus* від тривалості газ/УЗ-обробки.
Умови: $ЧМ_0 = 7 \cdot 10^4$ КУО/см³

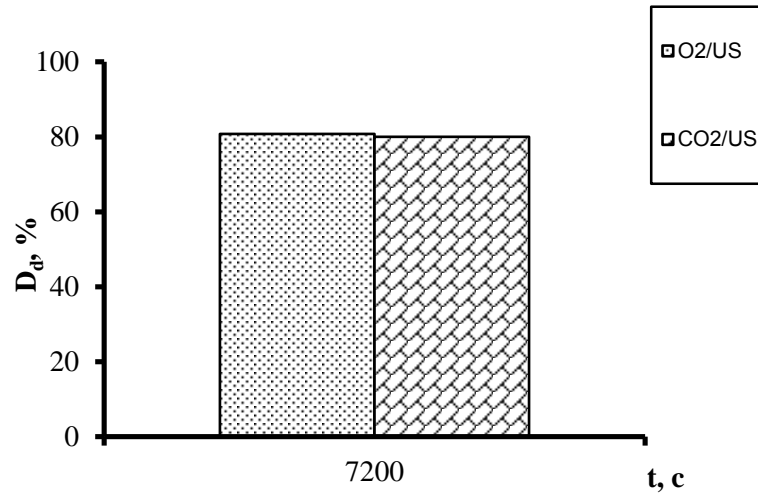


Рис. 3 – Залежність величини D_d для дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* від тривалості газ/УЗ-обробки. Умови: $ЧМ_0 = 5,2 \cdot 10^3$ КУО/см³ – для CO₂/УЗ та $ЧМ_0 = 1,9 \cdot 10^4$ КУО/см³ – для O₂/УЗ

Для бактерій та дріжджів при проведенні експериментів використано різні початкові числа мікроорганізмів ($ЧМ_0$), однак згідно наших попередніх досліджень величина ефективної константи швидкості загибелі МО (k_d) не залежить від вихідної кількості клітин у воді [16], розрахована за кінетичним рівнянням реакції першого порядку. Обчислені величини k_d для бактерій становлять: $4,36 \pm 0,03 \cdot 10^{-4}$, с⁻¹ – для O₂/УЗ та $2,52 \pm 0,03 \cdot 10^{-4}$, с⁻¹ – для CO₂/УЗ, а для дріжджів: $1,86 \pm 0,02 \cdot 10^{-4}$, с⁻¹ – для O₂/УЗ та $1,56 \pm 0,05 \cdot 10^{-4}$, с⁻¹ – для CO₂/УЗ, тобто співрозмірні з величинами ступенів руйнування досліджуваних мікроорганізмів.

Як бачимо, активніше руйнуються бактеріальні клітини від дріжджових як в

атмосфері кисню, так і в вуглекислому газі. Також згідно проведених досліджень можна порівняти ефективність руйнування МО в кавітаційному полі в залежності від природи газів і, таким чином, визначити газоподібну атмосферу, в якій цей процес є найбільш ефективним. Як бачимо, більшу ефективність в процесах знезараження води виявляє кисень для обох досліджуваних видів МО. Це пояснюється утворенням додаткових радикалів в присутності кисню в кавітаційних умовах та інтенсифікації процесу. Таким чином встановлено, що ефективність руйнування МО залежить не лише від різновиду присутніх мікроорганізмів у воді, але й від природи барботованого газу в кавітаційних умовах.

Висновки

Досліджено дію кисню та вуглекислому газу на процес руйнування бактерій і дріжджів в умовах кавітації. За розрахованими величинами відношення кількості мікроорганізмів щодо початкової кількості мікроорганізмів, вираженими у відсотках відзначено більшу ефективність руйнування бактеріальних клітин, порівняно з дріжджовими. В процесі дослідження впливу

природи газу на ефективність знезараження води в кавітаційних умовах показано, що мікроорганізми, незалежно від їх родової приналежності, активніше руйнувались в умовах O₂/УЗ, порівняно з CO₂/УЗ. Отже, процес очищення води в кавітаційних умовах залежить від природи барботованого газу та родової ознаки мікроорганізмів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Література

1. Мягченко О. П. Основы экологии : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 312 с.
2. Альохіна Т. М., Бобко А. О., Малахов І. М. Вміст важких металів у воді та донних відкладах річки Інгулець. *Гидробиологический журнал*. 2008. Т. 44, № 3. С. 114-120.
3. Сало Т. Л., Чернокозинський А.В., Вашкулат М.П. Вплив стічних вод міст на формування якості водних ресурсів у басейні середнього Дніпра. *Довкілля та здоров'я*. 2008. Т. 3, № 46. С. 76-78.
4. Буря О. І., Кудина О. Ф. Вода – властивості, проблеми та методи очищення : монографія. Дніпропетровськ : Пороги, 2006. 520 с.
5. Bhavya M. L., Umesh H. H. Sono-photodynamic inactivation of Escherichia coli and Staphylococcus aureus in orange juice. *Ultrasonics Sonochem.* 2019. Vol. 57. P. 108-115.
6. Iorio M. C., Bevilacqua A., Corbo M. R., Sinigaglia M., Altieri C. 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.
7. 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.
8. Li Y., Shi X., Zhang Zh., Peng Y. Enhanced coagulation by high-frequency ultrasound in Microcystis aeruginosa-laden water: Strategies and mechanisms. *Ultrasonics Sonochem.* 2019. Vol. 55. P. 232-242.
9. Carrillo-Lopez L. M., Huerta-Jimenez M., Garcia-Galicia I. A. Bacterial control and structural and physico-chemical modification of bovine *Longissimus dorsi* by ultrasound. *Ultrasonics Sonochem.* 2019. Vol. 58. P. 104-108.
10. 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.
11. Palanisamy N., Seale B., Turner A. Low frequency ultrasound inactivation of thermophilic bacilli (*Geobacillus* spp. and *Anoxybacillus flavithermus*) in the presence of sodium hydroxide and hydrogen peroxide. *Ultrasonics Sonochem.* 2019. Vol. 51. P. 325-331.
12. Stamper D. M., Holm E. R., Brizzolara R. A. Exposure times and energy densities for ultrasonic disinfection of Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Enterococcus avium, and sewage. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2008. Vol. 7, No 2. P. 139-146.
13. Lambert N., Rediers H., Hulsmans A., Joris K. Evaluation of ultrasound technology for the disinfection of process water and the prevention of biofilm formation in a pilot plant. *Water Sci Technol.* 2010. Vol. 61, No 5. P. 1089-1096.
14. Naddeo V., Cesaro A., Mantzavinos D., Fatta-Kassinos D. Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation - a critical review. *Global Nest Journa.* 2014. Vol. 16, No 3. P. 561-577.
15. 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.
16. Koval I. Microbial disaggregation with and without gas bubbling under cavitation conditions. *The environment and the industry*. 2017. Vol. 22. P. 56-60.

References

1. Myahchenko, O. P. (2010). *Fundamentals of ecology*. Kyiv: Center for Educational Literature (in Ukrainian).
2. Alohina, T. M., Bobko, A. O. & Malakhov, I. M. (2008). Content of heavy metals in water and sediments of the Ingulets River. *Hydrobiological Journal*, 44(3), 114-120 (in Ukrainian).
3. Salo, T. L., Chornokozynskyy, A. V. & Vashkulat, M. P. (2008). Impact of urban wastewater on the formation of water quality in the Middle Dnieper basin. *Environment and health*, 3(46), 76-78 (in Ukrainian).
4. Burya, O. I. & Kudyna, O. F. (2006). *Water - Properties, Problems and Methods of Purification*. Dnepropetrovsk : Thresholds (in Ukrainian).
5. Bhavya, M. L. & Umesh, H. H. (2019). Sono-photodynamic inactivation of Escherichia coli and Staphylococcus aureus in orange juice. *Ultrasonics Sonochem.*, 57, 108-115.
6. Iorio, M. C., Bevilacqua, A., Corbo, M. R., Sinigaglia, M. & Altieri, C. (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.*, 52, 477-483.
7. Kong, Y., Peng, Y. & Zhang, Zh. (2019). Removal of Microcystis aeruginosa by ultrasound: Inactivation mechanism and release of algal organic matter. *Ultrasonics Sonochem.*, 56, 447-457.
8. Li, Y., Shi, X., Zhang, Zh. & Peng, Y. (2019). Enhanced coagulation by high-frequency ultrasound in Microcystis aeruginosa-laden water: Strategies and mechanisms. *Ultrasonics Sonochem.*, 55, 232-242.
9. Carrillo-Lopez, L. M., Huerta-Jimenez, M. & Garcia-Galicia, I. A. (2019). Bacterial control and structural and physicochemical modification of bovine *Longissimus dorsi* by ultrasound. *Ultrasonics Sonochem.*, 58, 104-108.

10. Park, J., Son, Y. & Lee, W. H. (2019). Variation of efficiencies and limits of ultrasonication for practical algal bloom control in fields. *Ultrasonics Sonochem.*, 55, 8-17.
11. Palanisamy, N., Seale, B. & Turner, A. (2019). Low frequency ultrasound inactivation of thermophilic bacilli (*Geobacillus* spp. and *Anoxybacillus flavithermus*) in the presence of sodium hydroxide and hydrogen peroxide. *Ultrasonics Sonochem.*, 51, 325-331.
12. Stamper, D. M., Holm, E. R. & Brizzolara, R. A. (2008). Exposure times and energy densities for ultrasonic disinfection of *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus avium*, and sewage. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 7(2), 139-146.
13. Lambert, N., Rediers, H., Hulsmans, A. & Joris K. (2010). Evaluation of ultrasound technology for the disinfection of process water and the prevention of biofilm formation in a pilot plant. *Water Sci Technol.*, 61(5), 1089-1096.
14. Naddeo, V., Cesaro, A., Mantzavinos, D. & Fatta-Kassinos, D. (2014). Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation - a critical review. *Global Nest Journal*, 16(3), 561-577.
15. Luhovskyi, O. F., Gryshko, I. A. & Bernyk, I. M. (2018). Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 40, 95-101.
16. Koval, I. Z. (2017). Microbial disaggregation with and without gas bubbling under cavitation conditions. *The environment and the industry*, 22, 56-60.

Надійшла до редколегії 05.03.2020

Прийнята 15.04.2020