

**ЕФЕКТИВНІСТЬ КАВІТАЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ
ЗАЛЕЖНО ВІД ПРИРОДИ БАРБОТОВАНОГО ГАЗУ****Л. І. Шевчук, І. Є. Никулишин, Л. М. Предзимірска, Т. В. Чайківський, Т. С. Фалик**

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: shev-lili@mail.ru

Досліджено вплив кавітації на процес знезараження води від бактерій роду *Diplococcus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* та *Sarcina lutea*. Запропоновано подачу газів і газових сумішей різної природи, а саме, азоту та повітря, до реакційного середовища для знезараження води від бактерій та очищення від органічних сполук в умовах кавітації. Культивування досліджуваних мікроорганізмів проводили глибинним методом. Вміст органічних речовин визначали за показником хімічного споживання кисню. Досліджено, що кавітаційний процес знезараження води незалежно від природи барботованого газу, можна описати, застосувавши кінетичне рівняння першого порядку. Підтверджено звукохімічну залежність ефективної константи швидкості руйнування мікроорганізмів від тривалості обробки, різновиду мікроорганізмів і природи барботованого газу. Встановлено доцільність барботування азоту при кавітаційному очищенні води від мікроорганізмів та органічних сполук.

Ключові слова: кавітація, очищення, мікроорганізми, ультразвук, знезараження, органічні сполуки.**ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ПРИРОДЫ БАРБОТИРУЕМОГО ГАЗА****Л. И. Шевчук, И. Е. Никулишин, Л. И. Предзимирска, Т. В. Чайкинский, Т. С. Фалык**

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. Степана Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: shev-lili@mail.ru

Исследовано влияние кавитации на процесс обеззараживания воды от бактерий рода *Diplococcus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus* и *Sarcina lutea*. Предложена подача газов и газовых смесей различной природы, а именно азота и воздуха, в реакционную среду для обеззараживания воды от бактерий и очистки от органических соединений в условиях кавитации. Культивирование исследуемых микроорганизмов проводили глубинным методом. Содержание органических веществ определяли по показателю химического потребления кислорода. Доказано, что кавитационный процесс обеззараживания воды, независимо от природы барботируемого газа, можно описать, применив кинетическое уравнение первого порядка. Подтверждено звукохимическую зависимость эффективной константы скорости разрушения микроорганизмов от продолжительности обработки, вида микроорганизмов и природы барботируемого газа. Установлено целесообразность барботирования азота при кавитационной очистке воды от микроорганизмов и органических соединений.

Ключевые слова: кавитация, очистки, микроорганизмы, ультразвук, обеззараживания, органические соединения.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. До найважливіших проблем сьогодення, що стосуються кожного жителя планети й від яких залежить майбутнє людства, слід віднести екологічні проблеми. З розвитком цивілізації та науково-технічного прогресу, бурхливим зростанням кількості населення на Землі, обсягів виробництва та його відходів, проблеми стосунків між суспільством і природою дедалі загострюються. Складність і трагізм сучасного історичного періоду полягає в тому, що гідросфера вже не може саморегулюватися за рахунок природних механізмів. Перспективні розрахунки показують, що при збереженні таких темпів споживання і з урахуванням приросту населення й обсягів виробництва до 2100 р. людство може вичерпати всі запаси прісної води. На даний час потреба в прісній воді не задовільняється в 20 % міського і 75 % сільського населення планети. Необхідна докорінна зміна стратегії розвитку суспільства, перехід на екологічно чисті технології та методи ведення сільського господарства, альтернативні види енергетики, скорочення споживання ресурсів, самообмеження потреб тощо.

Інноваційні технології та розроблене обладнання для водоочищення мають повною мірою відповідати вимогам енерго- і ресурсозбереження, екологічної безпеки, бути конкурентоспроможними в сучасних умовах ринкової економіки. Це можливо, якщо в їх

основу покладені прогресивні інноваційні ідеї. Одним із таких інноваційних напрямків є ефективне використання кавітаційних явищ [1–3].

Вивченням взаємодії потужних акустичних хвиль з речовиною та виникаючих при цьому хімічних і фізико-хімічних ефектів займається звукохімія. Зародження і розвиток звукохімії було започатковано дослідженнями з акустики та хімічної кінетики. Річардс і Луміс (1927 р.) установили, що під дією ультразвуку (УЗ) прискорюється реакція гідролізу диметилсульфату, реакція Ландольта і реакція руйнування йодистого калію. Це відкриття стало відправною точкою для експериментальних пошуків нових звукохімічних реакцій.

За цей час в активі людства з'явилися десятки високоефективних, ресурсозберігаючих та екологічно безпечних УЗ технологій. Кавітаційний вплив дозволяє прискорити багато хіміко-технологічних процесів і синтезувати нові речовини (біо-, наноматеріали, каталізатори) [4, 5].

Майже всі мікроскопічні рослини й організми гинуть, якщо піддати їх дії УЗ. Цей факт на даний час розглядається як альтернативний, безпечний шлях для очищення води і продуктів харчування [6].

При дослідженні впливу УЗ на ціанобактерії (*Microcystis aeruginosa*) результати вказують на високу ефективність УЗ частотою 20 кГц з інтенсивні-

стю $0,0403 \text{ Вт/см}^3$. Більш високі частоти 580 кГц ($0,0041 \text{ Вт/см}^3$), також призводять до інактивації клітин, однак механічна енергія кавітації є меншою [7].

З'ясовано, що при дії УЗ підвищується чутливість мікроорганізмів (МО) до дезінфікуючих речовин. Стерилізуючий ефект при обробці УЗ водних суспензій бактерій кишкової палички був досягнутий за значно менших концентрацій хлору, формаліну та інших дезінфікуючих речовин [6]. У роботі [8] досліджено антибактеріальний вплив озонованого (20 мкг/мл) фізіологічного розчину NaCl та УЗ середньої частоти ($400\text{--}500 \text{ кГц}$) на музейні штамми МО (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Enterococcus*, *Acinetobacter*, *C. Albicans*). Комплексний вплив УЗ й озонованого фізіологічного розчину повністю пригнічував зростання мікрофлори.

Кавітаційний вплив надає згубної дії на найрізноманітніші МО – патогенні і непатогенні, анаеробні й аеробні, вегетативні і спорові, а також руйнують продукти їх життєдіяльності [7]. Під впливом кавітації руйнуються кишкова (*Escherichia coli*) [8–11], черевнотифозна (*Salmonella typhi*) [12], дифтерійна (*Corynebacterium diphtheriae*), сінна (*Bacillus subtilis*) [13, 14] синьогнійна (*Pseudomonas aeruginosa*) [15] палички, правця (*Tetanus bacillus*), легіонелли (*Legionella pneumophila*) [9], коки (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Streptococcus*) [8, 11, 12, 16], трипаносоми (*Trypanosoma bacillus*), трихомонади (*Trichomonas*), збудник тифу (*Typhus recurrens*) [7], лістеріозу (*Listeria monocytogenes*) [18], кишкового ерсініозу (*Yersinia enterocolitica*) [19] тощо. Найменшу швидкість інактивації за кавітаційних умов мають стафілококи (62 % *Staphylococcus aureus* за 2 год.), найбільшу – бактерії групи кишкової палички (99,9 % *Escherichia coli* за 50 хв.) і проміжну позицію займають ентерококи (70 % *Streptococcus faecalis* за 50 хв.) [11]. УЗ високої інтенсивності надає руйнівної дії на віруси тютюнової мозаїки (*Tobacco mosaic virus*), висипнотифозні, грипу (*Influentia*), коклюшу, поліомієліту, енцефаліту (*Encephalitis virus*) і сказу [17]. Із патогенних МО найбільшу стійкість до впливу УЗ виявляють різні штами туберкульозних паличок (*Tuberculum bacillus*). Стерилізуюча дія УЗ на МО проявляється на частотах 20 кГц і вище при інтенсивності більше $0,5$.

Таким чином, метою роботи є проведення досліджень задля визначення особливостей процесів кавітаційного очищення забруднених мікроорганізмами (МО) та органічними речовинами водних розчинів від природи барботованого газу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для досягнення поставленої в роботі мети вирішувалися наступні задачі:

- дослідити ефективність впливу кавітаційної обробки на динаміку процесу інактивації МО поверхневих водойм на прикладі бактерій роду *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas*;

- дослідити вплив барботування газів різної природи до кавітаційної зони обробки на показники якості очищення стічних вод з органічними та біологічними забруднюючими чинниками.

Нами було здійснено цілий комплекс мікробіологічних досліджень чистих культур, виділених із різноманітних водних джерел різного походження з метою виявлення найбільш поширених видів МО у природних і стічних водах (СВ), які й стали підґрунтям у виборі мікробіологічних біооб'єктів експериментальної роботи.

Згідно з проведеними мікробіологічними дослідженнями у різних водних джерелах спостерігалась подібність якісного (та кількісного – для відкритих водойм) складу мікрофлори. Що ж до якісного складу виявлених МО, то можна зазначити: незалежно від походження досліджуваної води в ній виявлено декілька родів МО, які в подальшому використовувались для створення модельних розчинів.

Для дослідження впливу природи газу на ефективність кавітаційної обробки води нами було штучно створено модельні середовища на основі природної води із підвищеним вмістом бактерій різних родів *Diplococcus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus*, *Sarcina lutea*, які були виявлені при мікробіологічному мікроскопуванні природних і СВ.

Дослідження проводилися в атмосферах азоту та повітря в ультразвуковому (УЗ) полі та без нього при атмосферному тиску, температурі 298 К , частоті УЗ – 22 кГц . Час обробки до 120 хв . УЗ коливання частотою 22 кГц від низькочастотного генератора УЗДН – 2Т (потужність 90 Вт) передавали за допомогою магніострикційного випромінювача, зануреного в об'єм досліджуваної води з відомим початковим значенням мікробних чисел (МЧ). Вихідні значення оброблювальних зразків вод знаходились у діапазонах $\text{МЧ}_{\text{поч.}}=(8,4 \cdot 10^2\text{--}5 \cdot 10^5) \text{ КУО/см}^3$, тому для кращої наочності експериментальних даних запропоновано використання співвідношення МЧ/МЧ_0 .

Паралельно із визначенням МЧ у всіх досліджуваних зразках проводили і визначення органічних сполук за показником хімічного споживання кисню (ХСК). Для кращої наочності експериментальних даних, як і при використанні МЧ, запропоновано використання співвідношення ХСК/ХСК_0 .

Визначення загальної кількості МО у воді з метою здійснення її бактеріологічного дослідження використовували універсальне поживне середовище – м'ясо-пептонний агар (МПА: м'ясна вода (1 дм^3), пептон (10 г), агар (15 г)), для дріжджів – сусло-агар (СА: солодове сусло (1 дм^3) з вмістом сухих речовин ($6\text{--}8 \%$) та агару (2%)).

Культивування досліджуваних МО проводили глибинним методом. МО вирощували в термостаті при постійній температурі ($37 \text{ }^\circ\text{C}$ – для бактерій та $25\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ – для дріжджів) тривалістю 48 годин – для бактерій та $96\text{--}120 \text{ годин}$ – для дріжджів [20].

В основу ідентифікації входило не лише мікроскопування препаратів “роздавлена крапля”, фіксовані препарати клітин для вивчення їхніх морфологічних критеріїв, включаючи забарвлення за Грамом, а й вивчення культуральних і фізіологічних (реакція на кисень) властивостей МО, виявлених у досліджуваних водах.

Визначення ХСК здійснювали згідно з методикою, наведеною в [21].

Встановлено, що криві зміни залежності МЧ від часу та ХСК від часу спрямляються в координатах $(\ln \text{МЧ}/\text{МЧ}_0 - \tau)$ та $(\ln \text{ХСК}/\text{ХСК}_0 - \tau)$ відповідно, тому для опису кінетики процесу знезараження МО та руйнування органічних сполук у кавітаційних умовах було застосовано кінетичне рівняння першого порядку. Було розраховано ефективні константи швидкості знезараження бактерій та ефективні константи швидкості руйнування органічних сполук, також розраховано ступені знезараження та ступені очищення води в атмосферах досліджуваних газів.

Результати дії азоту в акустичних умовах на модельні розчини із різними типами забруднень показано на рис. 1.

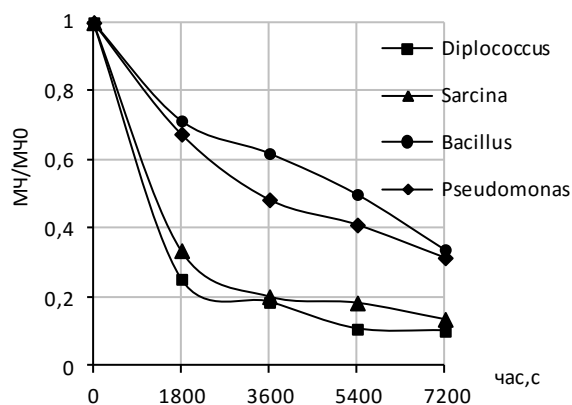


Рисунок 1 – Залежність МЧ/МЧ₀ модельних розчинів різного роду бактерій від часу озвучування в атмосфері азоту

Як слідує із рис. 1, найменш стійкими до дії азоту виявилися бактерії кулястої форми *Sarcina* і *Diplococcus*, сумісний вплив азоту та УЗ зумовив зменшення МЧ у 8,63 і 9,83 рази відповідно. При озвучуванні кулястих форм бактерій *Sarcina* спостерігається нижча інактивуюча дія, ніж на *Diplococcus*, оскільки пакет бактерій розпадається на окремі життєдатні коки, завдяки чому кожна окрема клітина дає початок утворенню нової колонії, що в подальшому збільшує їх загальну кількість [22].

Паличкоподібні бактерії роду *Bacillus* і *Pseudomonas* виявилися більш стійкими, і після двогодинної обробки УЗ в атмосфері азоту їх кількість зменшилася в 2,95 і 3,17 разів відповідно. Очевидно, що спороутворюючі бактерії роду *Bacillus* є більш стійкими до азот/УЗ дії порівняно з рештою досліджуваних МО, а, як відомо [23], ендоспори, на відміну від вегетативних клітин бактерій, більш стійкі до підвищеної температури, опромінення та дії хімічних речовин.

Терморезистентність спор пов'язують з умістом дипіколінової кислоти, якої немає у вегетативних клітинах. Стійкість до дії хімічних речовин й опромінення пояснюється багаточаровими оболонками.

Досліджуючи вплив азоту в кавітаційному полі на зміну величини ХСК залежно від ступеня інактивації окремих видів бактерій, присутніх в модельному розчині, встановлено (рис. 2), що не зале-

жно від роду бактерій відбувалося ефективне видалення органічних складових модельного розчину.

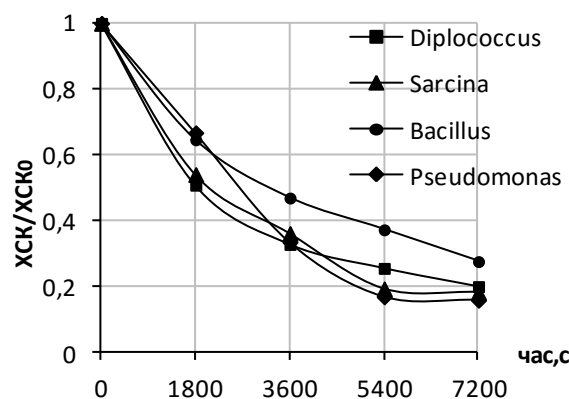


Рисунок 2 – Залежність ХСК/ХСК₀ від часу озвучування в атмосфері азоту

Було встановлено, що протягом двогодинної обробки найвищого ступеня очищення досягнуто при очищенні води від бактерій роду *Pseudomonas*, ХСК зменшилося в 6,4 рази порівняно з початковим значенням $\text{ХСК}_{\text{поч}}=3840 \text{ мг/дм}^3$, далі *Sarcina* – в 5,56 разів ($\text{ХСК}_{\text{поч}}=3560 \text{ мг/дм}^3$), *Diplococcus* – в 5,05 раз ($\text{ХСК}_{\text{поч}}=5760 \text{ мг/дм}^3$). Найменше видалення органічних домішок із модельного розчину спостерігали для бактерій роду *Bacillus* – в 3,65 раз ($\text{ХСК}_{\text{поч}}=2480 \text{ мг/дм}^3$).

Щодо сумісного впливу повітря й УЗ на досліджувані види бактерій, як впливає із рис. 3, найменш стійкими виявилися паличкоподібні бактерії *Bacillus* і *Pseudomonas* – їх кількість зменшилася в 1,98 і 2,49 разів відповідно.

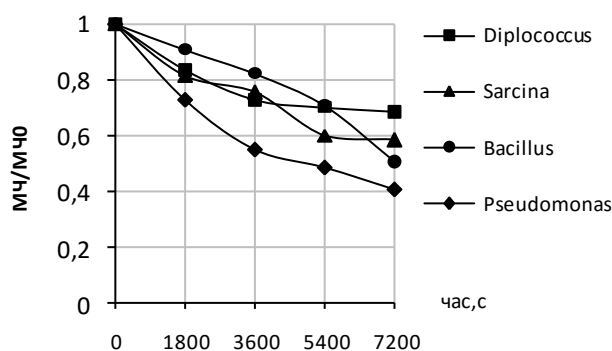


Рисунок 3 – Залежність МЧ/МЧ₀ модельних розчинів різного роду бактерій від часу озвучування в атмосфері повітря

Кулясті бактерії *Diplococcus* і *Sarcina* виявляють вищу резистентність, їх кількість зменшилася в 1,47 і 1,71 разів відповідно порівняно з вихідним значенням МЧ. Чутливість МО до УЗ пропорційна частоті УЗ коливань і тривалості його впливу, залежить також від індивідуальних особливостей і фізіологічного стану клітин. Паличкоподібні та вигнуті форми МО є більш чутливими до впливу УЗ, ніж коки [23, 24]. Спороносні бактерії *Bacillus* є більш стійкими до впливу УЗ, ніж аспорогенні [6, 23, 24].

Слід також зазначити, що МО різних таксономічних груп, в силу особливостей їх будови, не в рівній мірі піддаються фізико-механічному руйнуванню. Згідно з літературними даними [24, 25], клітинні стінки грам-позитивних бактерій набагато важче руйнуються, ніж стінки грам-негативних бактерій. Це пояснюється різницею товщини шару пептидоглікану. У грам-позитивних бактерій пептидоглікан із великою кількістю поперечних зв'язків утворює шар, товщина якого досягає 10 нм, а у грам-негативних бактерій пептидоглікан утворює тонку сітчасту структуру товщиною 2 нм. Отже, клітинні стінки грам-позитивних МО (*Diplococcus*, *Sarcina*, *Bacillus*) відрізняються високою механічною міцністю, порівняно з грам-негативними бактеріями *Pseudomonas*, що підтверджується розрахованими ефективними константами швидкості інактивації МО.

У результаті узагальнення та співставлення експериментальних даних (табл. 1), виявлено закономірність відмирання МО залежно від розміру клітин. Найбільш стійкими до дії повітря в УЗ полі є меншими за своїми розмірами бактерії роду *Diplococcus*. Очевидно УЗ впливом швидше і повніше руйнуються бактерії з більшим розміром, що підтверджується розрахованими ефективними константами швидкості відмирання МО.

Таблиця 1 – Залежність ефективної константи швидкості інактивації МО від їх розмірів

Рід бактерій	<i>Diplococcus</i>	<i>Sarcina</i>	<i>Pseudomonas</i>	<i>Bacillus</i>
Розмір бактерій, мкм	0,5–1,0	0,8–3,0	(0,5–0,8)–(1,5–3)	(0,9–1,5)–(3–5)
УЗ/пов, $k \cdot 10^4, c^{-1}$	0,64	0,82	1,36	0,80

Чим більші клітини, тим більш чутливі вони до впливу УЗ [23]. Очевидно тут більша ймовірність попадання кавітаційних бульбашок до більшої за розмірами клітини, ніж у меншу клітину.

Зміна кількості МО від часу описується кінетичним рівнянням першого порядку (рис. 4), що підтверджується спрямленням в координатах $\ln(MЧ/MЧ_0) - t$). Аналогічними є дані, одержані при вивченні дії повітря в УЗ полі та без нього на модельні середовища.

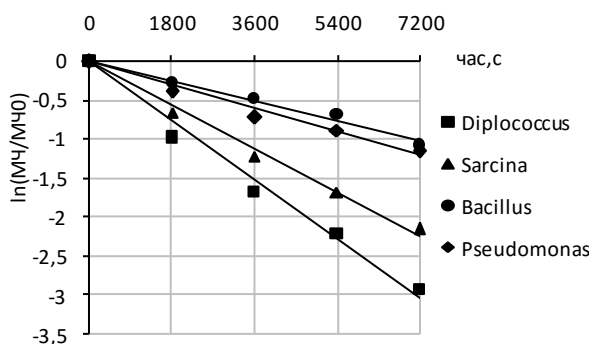


Рисунок 4 – Напівлогарифмічна анаморфоза звукохімічної залежності МЧ/МЧ₀ модельних розчинів від часу обробки в атмосфері азоту

Паралельно проводилися розрахунки для визначення порядку, за яким відбувається процес руйнування органічних складових модельних розчинів. Побудовані кінетичні криві мають лінійний характер, що підтверджує, що для опису даного процесу можна застосувати кінетичне рівняння першого порядку.

На основі наведених вище експериментальних даних були розраховані ефективні константи швидкості відмирання бактеріальних клітин і швидкості руйнування органічних сполук у модельних розчинах. Оскільки при проведенні досліджень в атмосфері самих газів спостерігалось зростання кількості бактеріальних клітин, тому розраховано значення лише тих ефективних констант, де власне спостерігалось відмирання МО та руйнування органічних домішок. Ефективна константа швидкості інактивації клітин характеризує кількість клітин, яка відмирає за 1 с обробки. Із цього випливає, що чим вище значення цієї величини, тим більше відмирає бактерій.

Розрахунок величин ефективних констант швидкостей інактивації МО підтверджує наведені дані й дозволяє встановити, що найвищу ефективність в кавітаційних умовах на досліджувані бактерії виявляє барботування азоту. Процес руйнування бактерій роду *Diplococcus* під впливом УЗ та азоту характеризується найвищим значенням ефективної константи їх відмирання – $3,81 \cdot 10^{-4} c^{-1}$, порівняно з бактеріями родів *Sarcina* – $3,33 \cdot 10^{-4} c^{-1}$. Барботування повітря в кавітаційних умовах діє протилежно на знезараження модельних розчинів. Найвищого значення ефективної константи швидкості кавітаційного знезараження МО в атмосфері повітря досягається при інактивації *Pseudomonas* і становить $1,36 \cdot 10^{-4} c^{-1}$, а найнижчого показника досягається при руйнуванні *Diplococcus* ($0,64 \cdot 10^{-4} c^{-1}$). Очевидно природа газу суттєво впливає на швидкість руйнування бактерій.

При барботуванні газу в УЗ полі відбувалося механічне руйнування зі зменшенням розміру бактеріальних агломератів, клітини фрагментувалися, потрапляли до розчину полімери та ензими, які входили до складу клітинних стінок, та деструкція поодиноких МО, і в розчин потрапляли речовини, що входили до складу ядер, рибосом, мітохондрій. Вони складаються переважно з органічних речовин (85–95 %), а саме, із білків, нуклеїнових кислот, вуглеводів, ліпідів, полісахаридів. Оскільки більшість органічного матеріалу є макромолекулярними сполуками, на останньому етапі макромолекули розкладаються до низькомолекулярних сполук, утворюються водорозчинні кислоти [26].

ВИСНОВКИ. Порівнюючи вплив повітря і азоту в УЗ-полі, можна зробити висновок, що вищий ступінь очищення досягається при барботуванні азоту. Очевидно досліджувані роди бактерій, які за їх здатністю використовувати кисень як термінальний (кінцевий) акцептор електронів належать до аеробів, виживають при барботуванні повітря, в складі якого є кисень, і гинуть в атмосфері азоту.

З наведених залежностей слідує, що в атмосфері азоту найкраще піддавалися знезараженню бактерії роду *Diplococcus*. Зумовлено це тим, що при їх руй-

нуванні відбувалося найбільше вивільнення клітинного матеріалу, а отже, і зростало ХСК протягом процесу. Тому в кінцевому результаті очищення від органічних складових є більш тривалим, що і підтверджується впливом азоту в кавітаційних умовах, де очисний ефект для бактерії роду *Diplococcus* є найменшим. Протилежну закономірність встановлено для бактерії роду *Pseudomonas* – їх інактивація відбувалася найслабше, а очищення від органічних складових відбувалося найшвидше, за єдиною відмінністю в ряді для спороносних бактерій роду *Bacillus*, характер інактивації яких носить інший механізм. Подібний результат досягається при озвучуванні в атмосфері повітря при очищенні від бактерії роду *Diplococcus*.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лиходумова М.А. Инновационные технологии водоподготовки для производства слабо- и безалкогольной продукции // Молодой ученый. – 2013. – № 10. – С. 159–161.
2. Прохасько Л.С., Ребезов М.Б., Асенова Б.К. и др. Применение гидродинамических кавитационных устройств для дезинтеграции пищевых сред // Сборник научных трудов Sworld: по материалам международной научно-практической конференции. – 2013. – Т. 7, № 2. – С. 62–67.
3. Быков А.В., Назарова Е.С. К вопросу использования кавитации в перерабатывающей промышленности сельскохозяйственного сырья. // Всерос. науч.-методич. конфер «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Секция «Роль прикладной биотехнологии и инженерии в развитии инновационного потенциала региона». – Оренбург, 2013. – С. 934–935.
4. Suslick K.S., Didenko Y., Fang M.M., Hyeon T., Kolbeck K.J. Acoustic cavitation and its chemical consequences // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1999. – № 357 (1751). – PP. 335–353.
5. Sáez V., Mason T.J. Sonochemical synthesis of nanoparticles // Molecules. – 2009. – Vol. 14, iss. 10. – PP. 4284–4299.
6. Хмелев В.Н., Сливин А.Н, Барсуков Р.В. и др. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
7. Wu X., Joyce E.M., Mason T.J. Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on *Microcystis aeruginosa* at different ultrasonic frequencies. // Water Research. – 2012. – № 46 (9). – PP. 2851–2858.
8. Берген И.Г., Дамбаев Г.Ц., Колесникова И.В., Богоутдинова А.В. Определение чувствительности микроорганизмов к воздействию озонированного раствора и ультразвука // Сибирский онкологический журнал. – 2009. – № 1. – С. 30–31.
9. Evora V.F., Kavarnos G.J. Ultrasonic Disinfection of Water Suspensions of *Escherichia Coli* and *Legionella Pneumophila* // NUWC-NPT Technical Report. – 1999. – 11, 086. – 18 p.
10. Коваль І.З., Шевчук Л.І., Старчевський В.Л. Ефективна дія ультразвуку на бактерії групи кишкової палички // Вісник Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування: збір. наук. праць. – 2010. – № 667. – С. 234–237.
11. Вітенько Т.М., Гащин О.Р. Комплексное воздействие гидродинамической кавитации, пероксида водорода и ионов серебра на микроорганизмы *Escherichia Coli* // Химия и технология воды. – 2011. – Т. 33, № 4. – С. 451–461.
12. Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Кавитация в технологиях очистки сточных вод // В мире научных открытий. – 2010. – № 5 (11), част. I. – С. 87–90.
13. Joyce E., Phull S.S., Lorimer J.P., Mason T.J. The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured bacillus us species // Ultrasonics Sonochemistry. – 2003. – № 10. – PP. 315–318.
14. Garcia M.L., Burgos J., Sanz B., Ordoñez J.A. Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of *Bacillus subtilis* // Journal of Applied Bacteriology. – 1989. – № 67 (6). – PP. 619–628.
15. Maleki A., Shahmoradi B., Daraei H., Kalantar E. Assessment of ultrasound irradiation on inactivation of gram negative and positive bacteria isolated from hospital in aqueous solution // Journal of Advanced Environmental Health Research. – 2013. – Vol. 1, № 1. – PP. 9–14.
16. Gaoa S., Gaoa S., Hemara Y., Ashokkumard M., Paturela S., Lewis G. Inactivation of bacteria and yeast using high-frequency ultrasound treatment // Journal Water Research. – Vol. 60. – PP. 93–104.
17. Шиляев А.С., Кундас С.П., Стукин А.С. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учебно-методическое пособие. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. – 110 с.
18. Pagán R., Mañas P., Palop A., Sala F. Resistance of heat-shock cells of *Listeria monocytogenes* to man-sonication and mano-thermo-sonication // Journal of Applied Microbiology. – 1999. – № 28. – PP. 71–75.
19. Raso J., Pagán R., Condón S., Sala F. Influence of temperature and pressure on the lethality of ultrasound // Journal Applied and Environmental Microbiology. – 1998. – № 64. – PP.465–471.
20. Слюсаренко Т.П. Лабораторный практикум по микробиологии пищевых производств. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 208 с.
21. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1974. – 336 с.
22. Эльпинер И. Е. Биофизика ультразвука. – М.: Наука, 1973. – 384 с.
23. Лысак В. В. Микробиология: учеб. пособие. – Минск: БГУ, 2007. – 430 с.
24. Pilar Cano M., Tapia V., Barbosa-Canovas G. Novel Food Processing Technologies // CRC Press. – 2004. – 681 p. – ISBN: 978-0-8247-5333-7.
25. Ливинская Е.П., Коваленко Н.К., Гармашева И.Л. Дезинтеграция лактобацилл и энтерококков для получения фрагментов клеточных стенок // Мікробіологічний журнал. – 2011. – Т. 73, № 3. – С. 26–32.

26. Старчевський В.Л., Максимів Н.Л. Зміна величини хімічного споживання кисню в процесі очищення води від бактеріального забруднення // Вісник Національного лісотехнічного університету

України. Економіка, планування і управління в лісовиробничому комплексі: збір. наук.-техн. праць. – 2008. – Вип. 18.2. – С. 91–95.

EFFECTIVENESS OF CAVITATIONAL WATER TREATMENT DEPENDING ON THE NATURE OF THE GAS BUBBLING

L. Shevchuk, I. Nykulyshyn, L. Predzimirska, T. Chaykivskyy, T. Falyk

National University "Lviv Polytechnic"

vul. Stepana Banderi, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: shev-lili@mail.ru

Purpose. Identification of the process features of cavitation purification of aqueous solutions contaminated by microorganisms and organic substances depending on the nature of bubbling gas. **Methodology.** We investigated the effectivity of the influence of cavitation treatment on the dynamics of microbial inactivation process of surface water with the sample of bacterial genus of *Diplococcus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus*, *Sarcina lutea*. An effect of the gas of different nature (air and nitrogen), bubbled into the area of cavitation treatment, was investigated on the level of water purification quality from organic and biological contaminants. Cultivation of the studied microorganisms has been carried out by deep-water method. The content of organic compounds was determined by chemical consumption of oxygen. Cavitation in the reaction mixture was created by ultrasonic generator UZDN-2T with magnetostrictor immersed in a certain volume of water with an initial known value of microbial number and chemical consumption of oxygen. **Results.** We found that the curves of dependence change of the microbial number versus time and chemical consumption of oxygen became linear in semi-logarithmic coordinates. Thus, to describe the kinetic of the process of water disinfection and destruction of organic compounds in cavitation conditions, the kinetic equations of the first order were applied. We calculated the effective rate constants of bacterial disinfection and the effective rate constants of the destruction of organic compounds. Also the levels of disinfection and water purification in the presence of the investigated gases were calculated. Sonochemical dependence of effective rate constant of microorganism destruction on the duration of treatment, the type of microorganism, and the nature of bubbled gas was confirmed. It was found the reasonability of nitrogen bubbling during cavitation water purification from microorganisms and organic compounds. **Originality.** It was found for the first time the physicochemical action of cavitation on the process of organic compound and microorganism destruction in the water, depending on the nature of bubbled gas. The effective rate constant of microorganism disinfection depends on the size of their cells, notably, faster and more complete destruction was observed for bacteria with larger size. **Practical value.** Experimental studies confirmed the reasonability of gas bubbling into cavitation medium that allows the use of this method in water purification technologies and water treatment. References 26, table 1, figures 4.

Key words: cavitation, purification, microorganisms, ultrasound, disinfection, organic compounds.

REFERENCES

1. Lihodumova, M.A. (2013), "Innovative water treatment technology for the production of low- and non-alcoholic beverages", *Molodoy uchonyy*, vol. 10, pp. 159–161.

2. Prokhasko, L.S. and Yarmarkin, R.V. (2013), "Application of hydrodynamic cavitation device for disintegrating food media", *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy* [Collection of scientific works Sworld on materials of the international scientific-practical conference]. Chelyabinsk, June 18–29, 2013, pp. 62–67.

3. Bykov, A.V. (2013), "To a question the use of cavitation processing industry of agricultural raw materials", *Unyversytetskyi kompleks kak rehyonalnyi tsentr obrazovaniya, nauki i kultury: Vserossiyskaya nauchno-metodicheskaya konferenziya. Sektsiya Rol prykladnoi byotekhnologii i inzhenerii v razvitii innovatsionnoho potentsiala regiona* [University complex as a regional center of education, science and culture: the All-Russia. scientific-methodical. Conference Section "The role of applied biotechnology and engineering in the development of innovative potential of the region."], Orenburg, 2013, pp. 934–935.

4. Suslick, K.S. and Wong, M. (1999), "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Philosophical Transactions of the Royal Society A:*

Mathematical, Physical and Engineering Sciences, no. 357 (1751), pp. 335–353.

5. Sáez, V., Mason, T. (2009), "Sonochemical synthesis of nanoparticles", *Jornal Molecules*, vol. 14, iss. 10, pp. 4284–4299.

6. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V. (2010), *Primenenie ultrazvuka vysokoi intensyvnosti v promyshlennosti* [Application of high-intensity ultrasound in the industry]. Altayskiy gosudarstvennyy tehnicheskiy universitet, Byisk, Russia.

7. Wu, X. and Mason, T. (2012), "Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on *Microcystis aeruginosa* at different ultrasonic frequencies", *Jornal Water Research*, vol. 46 (9), pp. 2851–2858.

8. Bergen, I.G., Bohoutdynova, A.V. (2009), "Susceptibility testing of micro-organisms to the effects of ozonated solution and ultrasound", *Sybyrskiy onkolohicheskyy zhurnal*, vol. 1, pp. 30–31.

9. Evora, V.F., Kavarnos, G.J. (1999), "Ultrasonic Disinfection of Water Suspensions of *Escherichia Coli* and *Legionella Pneumophila*", *NUWC-NPT Technical Report*, 11, 086, 18 p.

10. Koval, I.Z., Starchevskyy, V.L. (2010), "Effective action of ultrasound on *Escherichia coli*", *Journal of National University "Lviv Polytechnic". Chemicals, materials technology and their applications*, no. 667, pp. 234–237.

11. Vitenko, T.M., Gaschyn, O.R (2011), "The combined effects of hydrodynamic cavitation, hydrogen peroxide and silver ions on Escherichia Coli bacteria", *Jornal Chemistry and Technology of water*, vol. 4, pp.451–461.
12. Evstigneev, V.V., Kulagin, V.A., (2010), "Cavitation technology wastewater treatment", *Jornal In the world of scientific discoveries*, vol. 5 (11), pp. 87–90.
13. Joyce, E., Mason T. (2003), "The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured bacillus us species", *Jornal Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 10, pp. 315–318.
14. Garcia, M.L., Ordoñez, J.N. (1999), "Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of Bacillus subtilis", *Jornal of Applied Bacteriology*, vol. 67 (6), pp. 619–628.
15. Maleki, A., Kalantar, E. (2013), "Assessment of ultrasound irradiation on inactivation of gram negative and positive bacteria isolated from hospital in aqueous solution", *Journal of Advanced Environmental Health Research*, vol. 1, pp. 9–14.
16. Gaoa, S., Lewis, G. (2014), "Inactivation of bacteria and yeast using high-frequency ultrasound treatment", *Jornal Water Research*, vol. 60, pp. 93–104.
17. Shilyaev, A.S., Stukin, A.S. (2009), *Phizicheskie osnovy primeneniya ultrazvuka v medezhine i ekologii* [The physical basis for the use of ultrasound in medicine and ecology], translated by Kundas, S.P., Minsk, Belarus.
18. Pagán, R., Sala, F. (1999), "Resistance of heat-shock cells of Listeria monocytogenes to manosonication and mano-thermo-sonication", *Jornal of Applied Microbiology*, vol. 28, pp. 71–75.
19. Raso, J., Sala, F. (1998), "Influence of temperature and pressure on the lethality of ultrasound", *Jornal Applied and Environmental Microbiology*, vol. 64, pp. 465–471.
20. Slyusarenko, T.P. (1984), *Laboratornyy praktikum po mikrobiologii pischevych proizvodstv*, [Laboratory practice in microbiology food production], Legkay i pischevaya promyshlennost, Moskva, Russia.
21. Lurie, Y.Y., Rybnikov, A.I. (1974), *Chimicheskiy analiz proizvodstvennykh stochnykh vod* [Chemical analysis of industrial wastewater], Himiya, Moskva, Russia.
22. Elpiner, I.E (1973), *Biophizika ultrazvuka*, [Ultrasound Biophysics], Nauka, Moscow, Russia.
23. Lisak, V.V. (2007), *Microbiologiya*, [Microbiology], Nauka, Minsk, Belarus.
24. Pilar Cano, M., Barbosa-Canovas, G. (2004), *Novel Food Processing Technologies*, CRC Press, Boca Raton, USA.
25. Livinsky, E.P., Harmasheva, Y.L. (2011), "Disintegration of lactobacilli and enterococci to produce fragments of the cell wall", *Mikrobiologichnyi zhurnal*, vol. 3, pp. 26–32.
26. Starchevskyy, V.L., Maksymiv, N.L. (2008), "Change the value of chemical oxygen demand in the water purification from bacterial contamination", *Zbirnyk naukovo-tehnichnyh praz Nazionalnogo lisotehnichnogo universytetu Ukrainy*, vol. 18.2, pp. 91–95.

Стаття надійшла 30.03.2016.