

КОРОТКОТРИВАЛА АКУСТИЧНА ОБРОБКА ВОДИ

І. З. Коваль

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID: 0000-0001-8154-4154

Запропоновано метод очищення води від мікроорганізмів конкретного роду під час короткотривалої обробки акустичною кавітацією (частота 22 кГц, потужність 90 Вт). Для інтенсифікації процесу водоочищення застосовано поєднання дії акустичної кавітації з одночасним барботуванням газів різної природи (аргон, гелій, вуглекислий газ, кисень). Виявлено, що процес очищення води складається з двох процесів: нагримання мікробного числа, що спричинено руйнуванням мікробних агрегатів та зменшення мікробного числа, зумовленого руйнуванням мікробних клітин. Такі стадії виявлені як при акустичній обробці мікробної води, утвореної на основі дезаерованої дистильованої води, так і природної. Експериментально показано, що застосування барботування газів пришвидшує процес дезагрегації майже в 10 разів. Запропонований спосіб обробки різних вод при короткотривалій експозиції дозволив виявити процес дезагрегації мікробних клітин з подальшим їх руйнуванням у водному середовищі та досягнути високого ступеня знезараження води.

Ключові слова: бактерії *Bacillus cereus*, акустична обробка, очищення води, мікробне число, барботування газів.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Основною причиною забруднення природних водних басейнів є потрапляння до їх вод неочищених та недостатньо очищених стоків різноманітного походження. Особливо відчутної шкоди природним водоймам завдають різноманітні галузі нафтопереробної, хімічної та харчової промисловостей, застарілі та недосконалі технології яких супроводжуються утворенням значної кількості шкідливих для екології відпадків та стоків [1, 2]. Переважно підприємства цих галузей споживають значні об'єми води, яка в одних випадках використовується безпосередньо для технологічних процесів, а в інших – для супроводу та обслуговування технологій, тобто для очищення продуктів та напівфабрикатів, промивання пакувальної тари та обладнання тощо. При цьому, кількість стічної води (СВ), концентрація її забруднень залежні, першою чергою, від потужностей підприємства та запроваджених тут технологій.

Загальна тенденція світової практики останніх десятиліть - все наростаючий інтенсивний вплив техногенної складової на ступінь забруднення СВ та нерозривно пов'язану з цим якість води природних водойм. Саме цей вплив спонукає до необхідності розвитку нових енерго- та ресурсозберігаючих водоочисних технологій, що забезпечують не тільки успішне, а й економічно виправдане ефективне знешкодження комплексних забруднень природних джерел водопостачання.

До таких новітніх водоочисних технологій відносяться кавітаційні методи обробки рідин. Так, ряд авторів, досліджуючи дію ультразвуку (УЗ) на воду, вказують його високу ефективність при очищенні води від хімічних забруднень [3–5] та певних біологічних об'єктів: сапрофітних та патогенних мікроорганізмів (МО), вірусів, найпростіших [7–9] тощо. При цьому дослідники відзначають, що УЗ є ефективним безреагентним високоекоекологічним методом очищення води від органічних і мікробіологічних компонентів. На протигагу цьому, в роботі [9] відзначено, що повного руйнування патогенної флори досягають при застосуванні УЗ-обробки лише після довготривалого озвучування або при збільшенні потужності УЗ генераторів. Зрозуміло, що потреба у

такій довготривалій знезаражувальній обробці ставить під сумнів доцільність використання УЗ для промислових умов. Очевидно, все це результат недостатнього вивчення складних супроводжуючих кавітацію явищ, від необізнаності із основними закономірностями досліджуваного процесу, які характеризують взаємодію складових компонентів води, наявних у ній конкретних організмів, впливом додаткового газу, що подається при дії УЗ тощо. Адже ефективність бактерицидної дії як ультразвукової, так і гідродинамічної кавітації залежить від ряду обставин: параметрів даного фізичного чинника (потужності [10], інтенсивності, частоти коливань, експозиції [11]) тощо; деяких фізичних особливостей середовища, що піддається дії кавітації (температура, в'язкість); морфологічних особливостей об'єктів дослідження (розмірів і форм бактеріальних клітин, наявності капсули, хімічного складу мембран, віку культури [12–13] тощо); природи барботованого через оброблюване середовище газу при кавітаційному впливі [14–15] тощо.

Мета роботи – дослідити процес обробки різних вод при короткотривалій дії акустичної кавітації та встановлення доцільності одночасного барботування різних газів в реакційне середовище та кавітації.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Нами було проведено комплекс мікробіологічних досліджень природної води з озера у Львівській області. У даній воді було виявлено бактерії різних родів *Diplococcus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus cereus*, *Sarcina lutea*. У домінуючій кількості були наявні бактерії *Bacillus cereus*, тому дані бактерії були використані для створення модельного середовища. 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 та фізіологічних (реакція на кисень) властивостей МО, виявлених у досліджуваній воді.

Визначення загальної кількості МО у воді з метою здійснення бактеріологічного її дослідження використовували універсальне поживне середовище – м'ясо-пептонний агар.

Культикування досліджуваних МО проводили глибинним методом. МО вирощували в термостаті при постійній температурі (37°C) тривалістю 48 год [16].

Для дослідження впливу природи газу на ефективність кавітаційної обробки води експерименти здійснювали в атмосферах аргону, гелію, кисню, вуглекислого газу в УЗ полі при атмосферному тиску, температурі 298К, частоті УЗ - 22кГц. Час оброблення 1-120 хв. УЗ коливання частотою 22 кГц від низькочастотного генератора УЗДН – 2Т (потужність 90 Вт) передавали за допомогою магнітострикційного випромінювача, зануреного в об'єм досліджуваної води з відомим початковим значенням числа мікроорганізмів (ЧМ). Вихідні значення ЧМ оброблювальних зразків вод знаходились в діапазонах $ЧМ_{поч.} = 820 - 2090$ КУО/см³.

Подальші дослідження спрямовані на вивчення одночасної дії газу і УЗ на спорогенні паличкоподібні бактерії роду *Bacillus cereus* родини *Bacillaceae* при незначному мікробному забрудненні води ($ЧМ_0 = 8 \cdot 10^2$ КУО/см³) (рис.1). При короткочасній дії акустичного поля в атмосферах аргону, кисню, гелію та вуглекислого газів ($t_{газ/УЗ}=60 \div 180$ с) спостерігалось різке зростання ЧМ (І стадія). Наявність одночасної дії вуглекислого газу та УЗ зумовила зростання ЧМ на порядок ($2,4 \cdot 10^3$ КУО/см³) у перші три хвилини експерименту. Подальші сумісні дії газ/УЗ у всіх випадках сприяли різкому зменшенню ЧМ впродовж усього процесу обробки.

З метою дослідження даного явища було здійснено мікроскопування зразків води до і після сумісної газ/УЗ дії. В контрольних пробах води виявлено значну кількість мікробних агрегатів, тоді як після $t=180$ с в системі переважали в основному відокремлені клітини. Тому можна стверджувати, що нагромадження мікробних клітин на І стадії процесу зумовлено процесами дезагрегації. Очевидно, збільшення величини ЧМ прямопропорційне кількості клітин в агрегатах, виявлених у вихідних зразках води, а можливо, на процес дезагрегації впливає природа барботованого газу. Зростання ЧМ в присутності вуглекислого газу на 1600 КУО/см³, на відміну від зростання в присутності аргону лише на 100 КУО/см³, можливо, має вплив і на кінцеве значення ЧМ.

Таким чином, при обробленні в УЗ полі води, в якій наявні мікробні агрегати, домінуючим процесом є дезагрегація в присутності барботованих газів, яка в свою чергу, характеризується визначальним впливом на загальну ефективність процесу знезараження води. Тому, з метою дослідження процесу дезагрегації доцільно було здійснити даний процес без барботування газів, лише в акустичних умовах.

Для дослідження процесу дезагрегації було обрано реальну природну воду з озера, відібрану у Львівській обл. Проби води відбиралися впродовж літнього періоду (червень та липень), що обумовлено найбільшим її прогріванням і найнижчим її рівнем водонаповнення, коли коливання МЧ є максимальними.

Кількість МО коливалася в межах $820 \div 2090$ КУО/см³, що залежить від багатьох фізико-

хімічних чинників: температурного режиму водойми, який впливає на розвиток МО, концентрації розчиненого кисню у воді, величин рН води та окисно-відновного потенціалу, а також від температури навколишнього середовища, кількості опадів, гідродинамічного режиму водойми тощо.

Досліджуючи сумісну дію газ/УЗ на прикладі бактерій *Bacillus cereus* при $ЧМ_0 = 800$ КУО/см³ та вплив акустичної кавітації на природну воду з озера з підвищеним вмістом бактерій *Bacillus cereus* при $ЧМ_{01} = 820$ КУО/см³ та $ЧМ_{02} = 2090$ КУО/см³ була встановлена закономірність щодо зростання ЧМ на І-ій стадії процесу акустичної кавітації. Відмінність полягала лише у часі озвучування при якому спостерігалися максимальні значення ЧМ.

Різке зростання ЧМ спостерігалось при короткочасній дії акустичного поля на бактерії *Bacillus cereus* в атмосфері вуглекислого газу впродовж перших 60÷180с досліджу. При сумісній дії УЗ та аргону або гелію хоча і спостерігалось зростання ЧМ в початковий момент експерименту, однак із значно нижчими максимумами, ніж при сумісній дії вуглекислого газу та УЗ (рис. 1). Винятком була дія кисню, де збільшення ЧМ зовсім не спостерігалось.

При озвучуванні озерної води ЧМ досягає максимального значення через 1800с експерименту за відсутності барботування газу (рис. 2). Мікроскопічними дослідженнями даної води було виявлено скупчення агрегатів МО різних родів, а кількість поодиноких клітин була незначною. Енергія акустичної кавітації на даному етапі витрачалася в основному на розбивання скупчень даних агрегатів у поодинокі клітини, а відмирання відбувається повільніше, ніж дезагрегація. Аналогічна картина спостерігалася і при дії акустичної кавітації на скупчення виявлених агрегатів бактерій *Bacillus cereus* в атмосферах аргону, кисню, гелію та вуглекислого газів. Зменшення часу, витраченого на розбивання скупчень даних агрегатів у водному середовищі, цілком ймовірно, обумовлено насиченістю тим або іншим газом, адже за їх відсутності у водних розчинах є наявний лише розчинений кисень.

Водні розчини є не лише сприятливим середовищем для утворення кавітації, але і середовищем, що забезпечує можливість електронного пробоя кавітаційної порожнини. Йдеться про комплекс складних явищ, що полягають в утворенні молекул з надлишковою енергією і передачі цієї енергії іншим молекулам або атомам внаслідок взаємних зіткнень або випромінювань. З хімічної точки зору, процес збудження молекул води, швидкість їх дисоціації в значній мірі регулюється наявністю в кавітаційній порожнині тих чи інших газів, що знаходяться у збудженому стані. Хімічно-активні гази, розчинені в розчині, який озвучується, двояко впливають на УЗ хімічні реакції. По-перше, атоми оксигену та гідрогену беруть участь в реакціях трансформування радикалів, по-друге, хімічно-активні гази, при проникненні в кавітаційну порожнину, приймають участь в передачі енергії електронного збудження молекулам води, а також, можливо і в процесах перезарядження.

Згідно досліджень [17] синтез пероксиду водню легше відбувається у воді, яка насичена газовою сумішшю, що складається із кисню та інертного газу (аргону або гелію). Вплив інертних газів на думку Парка та Тейлора обумовлений підсиленням процесів іонізації, зокрема процесів дисоціації молекул кисню. При дослідженнях швидкості протікання хімічних реакцій у воді, що озвучується за відсутності кисню у роботах [18, 19] було встановлено вплив інертних газів на швидкість даної реакції. Підтвердженням цьому служили дані щодо озвучення водного розчину хлористого метилену (CH_2Cl_2) з утворенням нової сполуки з елементарною формулою ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{O}_3\text{Cl}_2$). На жаль, структурну формулу даної речовини встановити не вдалося. Однак, було досліджено, що синтез даної речовини в присутності УЗ хвиль протікає повільно в середовищі азоту, дещо швидше – в присутності повітря, найшвидше він завершується в середовищі аргону, а гелій – навпаки, дуже його сповільнює. Якщо врахувати, що у склад нової синтезованої речовини входить кисень, то його джерелом в присутності аргону повинні слугувати продукти розщеплення молекул води ($^{\circ}\text{OH}$ - радикали), оскільки, в процесі попереднього насичення розчину аргонем витіснявся кисень із досліджуваного зразка, що було перевірено полярографічним методом. На основі цього авторами [17] був зроблений висновок, що аргон, який барботується у водне середовище, що озвучується, сприяє більш інтенсивному розпаду молекул води в кавітаційній порожнині, внаслідок чого підсилюються процеси окиснення. Хлористий метилен піддається хімічним перетворенням безпосередньо у кавітаційній порожнині.

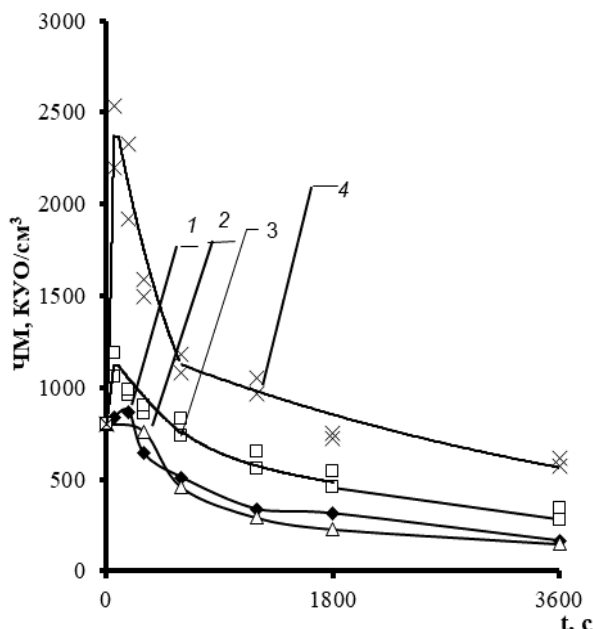


Рисунок 1 – Залежність ЧМ бактерій *V.cereus* від тривалості процесу: $\text{Ar}/\text{УЗ}$ (1), $\text{O}_2/\text{УЗ}$ (2), $\text{He}/\text{УЗ}$ (3) та $\text{CO}_2/\text{УЗ}$ (4). Вихідні дані: $\text{ЧМ}_0 = 8 \cdot 10^2 \text{ КУО}/\text{см}^3$.
Умови процесу: $T = 298 \pm 1 \text{ К}$

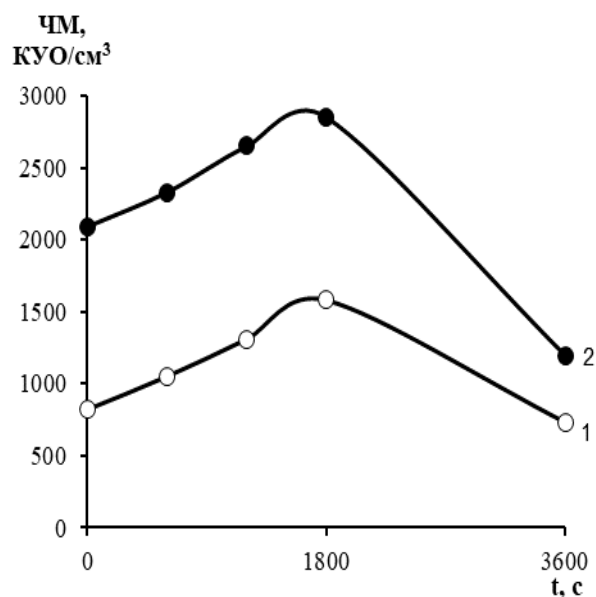


Рисунок 2 – Зміна ЧМ природної води від тривалості дії УЗ. Вихідні дані: $\text{ЧМ}_{01} = 820 \text{ КУО}/\text{см}^3$ (1) та $\text{ЧМ}_{02} = 2090 \text{ КУО}/\text{см}^3$ (2).
Умови процесу: $T = 298 \pm 1 \text{ К}$

Аналогічні дослідження були проведені з альбуміном сироватки, де у присутності аргону під дією УЗ хвиль утворювалось в 10 раз більше формальдегіду, ніж у присутності повітря. Також спостерігалось підсилення коагуляційних дій УЗ хвиль на білкові розчини [20–21].

З цього можна зробити висновок, що підсилююча дія аргону на процеси окиснення, які протікають в УЗ полі, залежить від будови та особливостей речовин, що реагують. За наявності аргону збільшується швидкість утворення $^{\circ}\text{OH}$ радикалів у воді, яка піддається обробці.

Виходячи із наведених вище літературних даних щодо окиснення водних розчинів органічних речовин у кавітаційних умовах, одержані нами експериментальні дані знезараження водних розчинів від бактерій *Bacillus cereus* (рис. 1-2) засвідчують ефективність одночасного барботування газів та дії УЗ хвиль на досліджуване водне середовище. Наявність того чи іншого газу зменшує період накопичення числа МО по відношенню до озвучування води без газів у 10 раз. Так, для води з $\text{ЧМ}_{\text{max}} = 1500 \text{ КУО}/\text{см}^3$ впродовж 1800с без барботування газів, а для зразка води із чистою культурою бактерій *Bacillus cereus* з однаковим вихідним значенням ЧМ відбулося його збільшення і становить відповідно: $\text{ЧМ}_{\text{max}} = 1100 \text{ КУО}/\text{см}^3$ – для гелію, $\text{ЧМ}_{\text{max}} = 850 \text{ КУО}/\text{см}^3$ – для аргону, $\text{ЧМ}_{\text{max}} = \text{КУО}/\text{см}^3$ – для вуглекислого газу впродовж $60 \div 180$ с досліджу. Як було встановлено, що збільшення величини ЧМ прямопропорційне кількості клітин в агрегатах, виявлених у вихідних зразках води. При цьому, на процес дезагрегації впливає і природа барботованого газу. В атмосфері аргону було досягнуто найвищого значення ефективної константи швидкості звукохімічного загибелі МО $k_d = 8,92 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ проти $k_d = 7,47 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ для кисню, у присутності якого взагалі не спостерігалось зро-

стання ЧМ. В атмосфері вуглекислого газу, де спостерігалось найвище значення $ЧМ_{\max}$ процес знезараження води від бактерій *Bacillus cereus* протікає найповільніше, що засвідчує значення $k_d = 6,99 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Розрахунок ефективних констант швидкостей звукохімічного загибелі МО ще раз підтверджує доцільність застосування газів (зокрема аргону) для знезараження води від бактерій *Bacillus cereus*, порівняно із застосуванням самого УЗ. Адже без барботування газів при дії УЗ хвиль на зразки води 1 та води 2 у реакційному середовищі наявний лише розчинений кисень, кількість якого є недостатньою для утворення додаткових центрів зародків кавітації.

ВИСНОВКИ. Доведено, що подача газу, впродовж перших трьох хвилин процесу, сприяє пришвидшенню у 10 раз розбиванню скупчень агрегатів у водному середовищі в акустичних умовах, порівняно із протіканням процесу за відсутності подачі газу, де аналогічний процес відбувається через 30 хвилин, що пов'язано з утворенням додаткових зародків кавітації при подачі газу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Уряднікова І. В. Аналіз і визначення техногенних ризиків при штатній роботі у процесі водоочищення методом реагентної коагуляції і електрокоагуляції. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 5-6 (124-125). С. 60–66.
2. Пономаренко Р. В., Пляцук Л. Д., Шерстюк М. М., Третяков О. В., Штепа В. М. Прогнозування впливу техногенного забруднення на якісний стан водної екосистеми річки Дніпро. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 2 (121). С. 73–78.
3. Бакланов А. Н., Чмиленко Ф. А. Ультразвук в интенсификации пробоподготовки при определении никеля в высокоминерализованных водах, рассолах и растворах поваренной соли. *Химия и технология воды*. 2001. Т. 23, № 1. С. 81–91.
4. Использование ультразвуковой обработки для снижения ХПК при очистке сточных вод углем. В. В. Маляренко, В. А. Яременко, Е. Н. Жукова, В. В. Гончарук. *Химия и технология воды*. 2004. Т. 26, № 5. С. 459–470.
5. Арсентьев С. Д. Окисление ионов Г в условиях кавитации в растворе иодида калия. *Хим. журн. Армении*. 2006. 59, № 3. С. 18–22.
6. Hydrazine degradation by ultrasonic irradiation. H. Nakui, K. Okitsu, Y. Maeda, R. Nishimura. The 1 European Conference “Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes (EAAOP-1)”: program and book of abstract, Sept. 7-9, 2006. Chania: Techn. Univ. Crete, 2006. 248 p.
7. Sonochemical substrate selectivity and reaction pathway of systematically substituted azo compounds. A. Rehorek, P. Hoffmann, A. Kandelbauer, G. M. Gubit. *Chemosphere*. 2007. 67, No 8. P. 1526–1532.
8. Bsoul A. A. Effectiveness of ultrasound for the destruction of Mycobacterium strain. 11th Meeting of the European Society of Sonochemistry: program and book of abstract, La Grande-Motte, June 1-5. France, 2008. 133 p.
9. Влияние ультразвуковой кавитации на жизнеспособность микроорганизмов. Марчук Л. В., Прокопенко Г. В., Луговской А. Ф., Гришко И. А. *Наукові праці ДонНТУ*. 2011. Вип. 22(195). С. 195–206.
10. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. Тернопіль: Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 224 с.
11. Effect of process parameters on the energy requirement in ultrasonical treatment of waste sludge. R. Kidak, A.-M. Wilhelm, H. Delmas. *Chem. Eng. and Process*. 2009. 48, No 8. P. 1346–1352.
12. Очищення води від хімічних і біологічних забруднень в умовах ультразвукової кавітації. В. Л. Старчевський, Л. І. Шевчук, О. М. Кузьо. *Вісник НУ “Львівська політехніка”*. 2005. № 529. С. 174–177.
13. Кинетика изменения химических и бактериальных загрязнений воды, содержащей клетки дрожжей. В. Л. Старчевський, В. М. Кисленко, Н. Л. Максымив, И. З. Коваль. *Химия и технология воды*. 2009. Т. 31, № 4. С. 469–477.
14. Dependence of microbial cells disappearance rate of their concentration. I. Z. Koval, V. L. Starchevskyy, L. I. Shevchuk. 12th Meeting of the European Society of Sonochemistry : program and book of abstracts, May 30 - June 03. Chania, Crete, Greece, 2010. 106 p.
15. Вплив інертного газу на очищення води від біологічних забруднень в умовах кавітації. Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський, О. М. Кузьо. *Вісник НУ “Львівська політехніка”*. 2005. № 536. С. 178–181.
16. Слюсаренко Т. П. Лабораторный практикум по микробиологии пищевых производств. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 208с.
17. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (OH/O⁻) in aqueous solution. G. V. Buxton, C. L. Greenstock, W. P. Helman, A. B. Ross. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1988. № 17. P. 513–886.
18. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. A. Tiehm, K. Nickel, M. Zellhorn, U. Neis. *Water Research*. 2001. Vol. 35, No 8. P. 2003–2009.
19. Application of UV radiation or electrochemistry in conjunction with power ultrasound for the disinfection of water. E. M. Joyce, T. J. Mason, J. P. Lorimer. *International Journal of Environment and Pollution*. 2006. Vol. 27, No. 1/2/3. P. 222–230.
20. Uses of ultrasound in the biological decontamination of water. T. J. Mason, H. Duckhouse, E. Joyce, J. P. Lorimer. WCU 2003: program and book of abstract, September 7-10, Paris. 2003. P. 121–123.
21. The effect of mixing and sonication during protein coagulation on the particle size distribution in the suspension created. L. Zander, F. Dajnowiec, Z. Zander, D. Mickiewicz, M. Biegaj. 14th European Conference on Mixing, 10-13 September. Warszawa, 2012. P. 523–527.

SHORT-TERM ACOUSTIC WATER TREATMENT

I. Koval

Lviv Polytechnic National University

ORCID: 0000-0001-8154-4154

Purpose. To investigate the process of treatment of different waters with short-term action of acoustic cavitation and to establish the expediency of simultaneous bubbling of different gases into the reaction medium and cavitation. **Methodology.** The duration of the disaggregation process during the processing of the model medium is 2–3 minutes, while for natural water – 30 minutes. The number of microorganisms (NM) before and after the experiments was determined by counting the colonies that grew on the Petri dishes. For the research we used a model medium based on distilled water with the addition of bacillary cells and natural water. The model environment was exposed to gases of different nature and acoustic cavitation, and natural water was treated only by cavitation. **Results.** It was found that the process of water purification consists of two processes: the accumulation of microbial counts caused by the destruction of microbial aggregates and the reduction of microbial counts caused by the destruction of microbial cells. Such stages are revealed both at acoustic processing of the microbic water formed on the basis of disaerated distilled water, and natural. It has been experimentally shown that the use of bubbling gases accelerates the disaggregation process by almost 10 times. The proposed method of treatment of different waters with short-term exposure allowed to detect the process of disaggregation of microbial cells with their subsequent destruction in the aqueous medium and to achieve a high degree of water disinfection. **Originality.** The article proposes the supply of gases of different nature in the reaction medium for disinfection of water from bacteria under cavitation. It has been proven that gas supply during the first three minutes of the process accelerates the breakdown of aggregate aggregates in the aquatic environment under acoustic conditions, which is associated with the formation of additional cavitation nuclei, compared to the process in the absence of gas supply. It was found that at the initial moment of the reaction, the energy of cavitation was spent on breaking up clusters of bacterial aggregates into single cells, and death occurs more slowly than disaggregation. **Practical value.** It has been experimentally proved that the accumulation of microbial counts in the first stage of the water purification process with short-term action of acoustic cavitation is due to the processes of disaggregation of microorganisms. References 27, figures 2.

Key words: Bacillus cereus bacteria, acoustic treatment, water purification, microbial count, gas bubbling.

REFERENCES

1. Uryadnikova, I. V. (2020). Analiz i vyznachennya tekhnohennykh ryshchikiv pry shtatniy roboti u protsesi vodoochyschennya metolom reahentnoyi koahulyatsiyi i elektrokoahulyatsiyi [Analysis and determination of technogenic ryshchik at regular work in the process of water purification by the method of reagent coagulation and electrocoagulation]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho*. No. 5-6 (124-125), pp. 60-66. [in Ukrainian]
2. Ponomarenko, R. V., Plyatsuk, L. D., Shershtyuk, M. M., Tret'yakov, O. V., Shtepa, V. M. (2020). Prohnozuvannya vplyvu tekhnohennoho zabrudnennya na yakisnyy stan vodnoyi ekosystemy richky Dnipro [Forecasting the impact of man-made pollution on the quality of the aquatic ecosystem of the Dnieper River]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho*. Vol. 2 (121), pp. 73-78. [in Ukrainian]
3. Baklanov, A. N., Chmilenko, F. A. (2001). Ul'trazvuk v intensifikatsii probopodgotovki pri opredelenii nikelya v vysokomineralizovannykh vodakh, rassolakh i rastvorakh povarennoy soli [Ultrasound in the intensification of sample preparation for the determination of nickel in highly mineralized waters, brines and sodium chloride solutions]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. Vol. 23(1), pp. 81-91. [in Russia]
4. Malyarenko, V. V., Yaremenko, V. A., Zhukova, Ye. N., Goncharuk, V. V. (2004). Ispol'zovaniye ul'trazvukovoy obrabotki dlya snizheniya KHPK pri ochistke stochnykh vod uglem [Use of ultrasonic treatment to reduce COD in coal wastewater treatment]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. Vol. 26(5), pp. 459-470. [in Russia]
5. Arsent'yev, S. D. (2006). Okisleniye ionov I⁻ v usloviyakh kavitatsii v rastvore iodida kaliya [Oxidation of I⁻ ions under cavitation conditions in a potassium iodide solution]. *Khim. zhurn. Armenii*. Vol. 59(3), pp. 18-22. [in Russia]
6. Nakui, H., Okitsu, K., Maeda, Y., Nishimura, R. (2006). Hydrazine degradation by ultrasonic irradiation. *The 1 European Conference "Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes (EAAOP-1)", (Crete, September 7-9, 2006)*. Chania, p. 248.
7. Rehorek, A., Hoffmann, P., Kandelbauer, A., Gübitz, G. M. (2007). Sonochemical substrate selectivity and reaction pathway of systematically substituted azo compounds. *Chemosphere*. Vol. 67(8), pp. 1526-1532.
8. Bsoul, A. A. (2008). Effectiveness of ultrasound for the destruction of Mycobacterium strain. *11th Meeting of the European Society of Sonochemistry. (La Grande-Motte, June 1-5, 2008)*. France, p. 133.
9. Marchuk, L. V., Prokopenko, G. V., Lugovskoy, A. F., Grishko, I. A. (2011). Vliyaniye ul'trazvukovoy kavitatsii na zhiznesposobnost' mikroorganizmov [Influence of ultrasonic cavitation on the viability of microorganisms]. *Naukovi pratsi DonNTU*. Vol. 22(195), pp. 195-206. [in Ukrainian]
10. Vitenko, T. M. (2009). Hidrodinamichna kavitatsiya u masoob-minnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh: monohrafiya [Hydrodynamic cavitation in mass exchange, chemical and biological processes: monograph]. *Vydavnytstvo TDTU im. I. Pulyuya, Ternopil*, 224 p. [in Ukrainian]

11. Kidak, R., Wilhelm, A.-M., Delmas, H. (2009). Effect of process parameters on the energy requirement in ultrasonical treatment of waste sludge. *Chem. Eng. and Process.* Vol. 48(8), pp. 1346-1352.
12. Starchevskyy, V. L., Shevchuk, L. I., Kuzio, O. M. (2005). Ochyshchennya vody vid khimichnykh i biolohichnykh zabrudnen' v umovakh ul'trazvukovoyi kavitatsiyi [Purification of water from chemical and biological pollution in the conditions of ultrasonic cavitation]. *Visnyk NU "L'vivs'ka politekhnikha"*. Vol. 529, pp. 174-177. [in Ukrainian]
13. Starchevskiy, V. L., Kislenko, V. M., Maksymiv, N. L., Koval, I. Z. (2009). Kinetika izmeneniya khimicheskikh i bakterial'nykh zagryazneniy vody, soderzhashchey kletki drozhzhey [Kinetics of changes in chemical and bacterial contamination of water containing yeast cells]. *Khimiya i tekhnologiya vody.* Vol. 31(4), pp. 469-477. [in Russia]
14. Koval, I. Z., Starchevskyy, V. L., Shevchuk, L. I. (2010). Dependence of microbial cells disappearance rate of their concentration. *12th Meeting of the European Society of Sonochemistry, (Crete, May 30 - June 03, 2010).* Greece, p. 106.
15. Shevchuk, L. I., Starchevs'kyi, V. L., Kuz'o, O. M. (2005). Vplyv inertnoho hazu na ochyshchennya vody vid biolohichnykh zabrudnen' v umovakh kavitatsiyi [Influence of inert gas on water purification from biological pollution in the conditions of cavitation]. *Visnyk NU "L'vivs'ka politekhnikha"*. Vol. 536, pp. 178-181. [in Ukrainian]
16. Slyusarenko, T. P. (1984). *Laboratornyy praktikum po mikrobiologii pishchevykh proizvodstv* [Laboratory workshop on microbiology of food production]. *Legkaya i pishchevaya promyshlennost*, Moskva, 208 p. [in Russia]
17. Buxton, G. V., Greenstock, C. L., Helman, W. P., Ross, A. B. (1988). Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (OH/O⁻) in aqueous. *Journal of Physical and Chemical Reference Data.* No 17, pp. 513-886.
18. Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Water Research.* Vol. 35(8), pp. 2003-2009.
19. Joyce, E. M., Mason, T. J., Lorimer, J. P. (2006). Application of UV radiation or electrochemistry in conjunction with power ultrasound for the disinfection of water. *International Journal of Environment and Pollution.* Vol. 27(1/2/3), pp. 222-230.
20. Mason, T. J., Duckhouse, H., Joyce, E., Lorimer, J. P. (2003). Uses of ultrasound in the biological decontamination of water. *WCU (Paris, September 7-10, 2003).* Paris, pp. 121-123.
21. Zander, L., Dajnowiec, F., Zander, Z., Mickiewicz, D., Biegaj, M. (2012). The effect of mixing and sonication during protein coagulation on the particle size distribution in the suspension created. *14th European Conference on Mixing, (Warszawa, 10-13 September, 2012).* Warszawa, pp. 523-527.

Стаття надійшла 27.05.2021.