

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.19

УДК 66.088

Головань С.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Golovan Sergii, Postgraduate student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕРІВНОВАЖНОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ НА МІКРООРГАНІЗМИ

Показано, що електромагнітне випромінювання, яке виникає при реалізації нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) в плівковому режимі, може надавати низку впливів, які посилюють антимікробну дію дезінфектантів шляхом зміни іонної проникності мембрани, що, у поєднанні з хімічними препаратами, підвищує летальний і мутагенний ефекти при знезараженні води. Глибина проникнення в товщу води вищезгаданих випромінювань не перевищує $2 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ м, що значно знижує вплив цих ефектів у періодичних умовах дії плазми. Встановлено, що найбільш стійкими з досліджених видів мікроорганізмів до впливу ННТП виявилися коліфаги — для досягнення бактерицидного ефекту необхідне три-чотири-разове проходження оброблюваної рідини через зону реакції.

Ключові слова: вода; знезараження; інактивація; мікроорганізми; нерівноважна низькотемпературна плазма.

It is shown that electromagnetic radiation, which occurs during the implementation of non-equilibrium low-temperature plasma (NELTP) in the film mode, can have a number of effects that enhance the antimicrobial effect of disinfectants by changing the ionic permeability of the membrane, which, in combination with chemicals, increases the lethal and mutagenic effects during water disinfection. The depth of penetration into the water column of the above-mentioned radiation does not exceed $2 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ m, which significantly reduces the impact of these effects under periodic conditions of plasma action. It was established that the most resistant of the studied types of microorganisms to the effects of NELTP were coliphages — to achieve a bactericidal effect, three to four times the passage of the treated liquid through the reaction zone is required.

Keywords: water; disinfection; inactivation; microorganisms; non-equilibrium low-temperature plasma.

Постановка проблеми

Вода і продукти її дисоціації — водневі та гідроксильні іони — є важливими факторами, які визначають структуру та біологічні властивості живих мікроорганізмів. Природні та питні води майже завжди містять різноманітні мікроорганізми. Кількість їх визначається вмістом у воді поживних речовин, температурою, насиченістю водою киснем, дією бактеріофагів тощо. Крім сапрофітних бактерій, що беруть участь у колообігу речовин у водних басейнах, у воду разом з виробничими побутовими стічними водами потрапляють і патогенні (хвороботворні) мікроби. В даний час встановлено можливість поширення водним шляхом кишкових інфекцій (холери, черевного тифу, дизентерії та ін.), а також туляремії, кон'юнктивіту, поліомієліту, гельмінтозів тощо. Патогенні бактерії та віруси можуть бути внесені у воду з дощовими та стічними водами, відходами, при потрапленні стічної рідини у водопровідні труби або при випадковому з'єднанні технічного водопроводу з питним [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо, що природні та питні води майже завжди містять різні патогенні мікроорганізми, які вносяться у воду з дощем, стічними водами та можуть зберігатись у воді упродовж тривалого часу. Існує проблема — довести стан води за хімічними та біологічними показниками до певного рівня, який відповідає вимогам діючих санітарних норм і мінімальних енерговитрат. В Україні основним документом є ДСанПіН 2.2.4-171-10 («Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»).

У роботах [3, 4] представлені дослідження щодо впливу нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) на знезараження питної та стічної води. Авторами встановлено, що при впливі плазми упродовж 4—6 хв. у питній воді досягається повний бактерицидний ефект по відношенню до лактозопозитивних кишкових паличок, грамнегативних бактерій і сальмонел. Сальмонели гинуть вже через 2—3 хв. У стічній воді значно знижується чисельність лактозопозитивних кишкових паличок, ентерококів.

Виконано дослідження [5] зі створення універсальної технології та обладнання для обробки водних розчинів об'ємно-розсіяним плазмо-дуговим розрядом на поверхні фазового розділу газ – рідина (поверхня бульбашок у воді) для вилучення важких металів, радіонуклідів, знезараження, активування без внесення сторонніх речовин. Основний акцент зроблено на стабілізацію електро-пневмо-гідралічного режиму в зоні об'ємного розсіяного розряду для умов промислового використання. Наведено дані [6] щодо плазмового очищення води та ґрунту від важких металів і радіонуклідів у префектурі Фукусіма, забруднених внаслідок аварії на АЕС. Показано, що використання плазми в технології знезараження води є перспективним для промислового застосування. Установки плазмохімічної обробки води не вимагають спеціальних приміщень і можуть експлуатуватися в стаціонарному або мобільному варіантах для очищення та знезараження стічних вод різного походження та різної кількості. Витрати на обробку води за цією технологією не вищі, ніж традиційними методами.

Доведено, що використання плазми в технології знезараження води є перспективним для промислового застосування та має наступні переваги: відсутність утворення побічних продуктів і висока ефективність. Установки плазмохімічної обробки води не вимагають спеціальних приміщень і можуть експлуатуватися в стаціонарному або мобільному варіантах для очищення та знезараження стічних вод різного походження та різної кількості. Витрати на обробку води за цією технологією не вищі, ніж традиційними методами [7—9].

Термін виживання патогенних мікроорганізмів у природній воді залежить значною мірою від наявності мікробів-антагоністів, інтенсивності самоочищення тощо. Загальна кількість патогенних бактерій, які потрапили у водойми, з часом швидко зменшується. Встановлено, що при зараженні води з низькою температурою черевнотифозними та паратифозними бактеріями, 96,8 % з них гинуть вже через три дні. Однак окремі особини зберігаються у воді дуже тривалий час.

Встановлено, що ентеровіруси більш довговічні у воді, ніж бактерії, особливо при низьких температурах 4—10 °С. Враховуючи це, знезараження слід вважати обов'язковим для всіх вод, які використовуються для питних і господарських потреб.

Одним з найпоширеніших і найбільш широко застосовуваних методів знезараження води є хлорування [10].

Вода, сильно заражена бактеріями, добре знезаражується навіть малими дозами хлору. Однак при хлоруванні повної стерилізації води не відбувається, у ній залишаються поодинокі хлоррезистентні особини, які зберігають життєздатність [11].

Альтернативою методу хлорування води вважається її озонування. Озон, як знезаражувачий агент, діє швидше за хлор у 15—20 разів. Встановлено, що збудник дитячого паралічу — вірус поліомієліту — гине під дією 0,45 мг/дм³ озону через 2 хвилини, тоді як хлор має той самий ефект лише через 3 години при дозі 1 мг/дм³ [12].

Ще одним способом знезараження води є її обробка солями срібла. Про вплив іонного срібла безпосередньо на бактерії єдиної думки не існує. Відомо, що бактерії, протоплазма яких має негативний електричний заряд, притягують позитивно заряджені іони срібла. При дотику іонів срібла з бактеріями останні гинуть внаслідок фізіологічного впливу на них іонів металу.

Є дані, які підтверджують, що іони срібла, зв'язуючись нуклеїновою ядерною речовиною, утворюють нуклеїнати. Цим вони порушують життєдіяльність бактерій; кисень лише гальмує ріст останніх. Температура води також чинить дуже великий вплив на ефективність бактерицидної дії іонів срібла, що свідчить про значну роль хімічних процесів у цих явищах. Однак ці дослідження не розкривають причини загибелі мікроорганізмів під впливом срібла.

До недоліків розглядуваного методу, крім його високої вартості та специфічної дії на різні види патогенних мікроорганізмів, слід віднести також ту обставину, що оброблена вода

залишається забрудненою іонами срібла, несумісними з життєдіяльністю тваринних організмів і людини. Крім того, в реальних умовах, коли води містять різні неорганічні та органічні речовини в іонному та колоїдному стані та мають різні значення рН, бактерицидний ефект іонів срібла може різко знижуватися.

Значна частина патогенних збудників видаляється під час обробки води коагулянтами. Встановлено [13], що при експериментальному зараженні річкової води коагуляція алюміній сульфатом видаляє віруси на 40 %, кишкову паличку — на 85 %, а бактеріофаги кишкової палички — на 90 %. Виявлено, що процеси знезараження відбуваються паралельно з освітленням води. При цьому реагенти не інактивують мікроорганізми, а лише захоплюють їх в осад.

До очевидних недоліків методу коагуляції слід віднести його порівняно низьку ефективність, неминуче забруднення оброблюваної води коагулянтами, та навіть необхідність досить точного коригування значення рН, що також пов'язано з додатковим введенням у воду реагентних забруднювачів.

До інших методів бактеріального знезараження води відносяться її обробка ультрафіолетовим і радіоактивним випромінюванням, ультразвуком, термічна обробка, а також обробка з використанням струмів високої частоти. До загальних недоліків цих методів слід віднести їх вкрай низьку продуктивність, яка не дозволяє застосовувати їх у промислових системах водопідготовки, більшу тривалість процесу обробки, а також недостатню передбачуваність результатів, зумовлену недостатньою їх вивченістю.

Таким чином, особливий інтерес представляє вивчення впливу НТПП на загибель вірусів і бактерій, які можуть бути присутніми у питній воді.

Формулювання мети дослідження

Мета даної роботи — розробити технологію знезараження води від патогенних мікроорганізмів, вірусів, колифагів з використанням НТПП.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводилися на стендовій установці, основним вузлом якої є плазмохімічний реактор проточного типу (або каскадного типу). Генерація НТПП здійснювалася за допомогою бар'єрного розряду при атмосферному тиску. Джерело живлення: високовольтний імпульсний генератор (напруга $U = 10\text{--}30$ кВ, частота $f = 50\text{--}1000$ Гц). Пристрій забезпечував формування стабільної тонкої плівки води, що стікає по внутрішній поверхні або заземленого електрода. Товщина шару оброблюваної рідини (0,2; 0,5; 0,7 мм) регулювалася за допомогою зміни зазору між електродами.

Як модельні забруднення використовувалися суспензії мікроорганізмів у дистильованій або дехлорованій водопровідній воді: *Escherichia coli* (кишкова паличка), *Bacillus subtilis* (сінна паличка), *Pseudomonas putida*. Віруси (індикатори): колифаги (як модель стійкості до УФ та радикалів). Вихідна концентрація мікроорганізмів становила від 10^2 до $3,8 \cdot 10^6$ КУО/дм³, що відповідає рівню сильнозабруднених стічних вод.

Алгоритм експерименту в тонкому шарі (табл. 1): досліджувана вода подавалася в зону розряду так, щоб час експозиції (контакту з плазмою) становив сталу величину — 0,17 с. Варіювалася лише товщина шару рідини для визначення глибини проникнення активних частинок та УФ-випромінювання.

Таблиця 1. Вплив товщини шару, що обробляється, на інактивацію кишкової палички

Товщина шару, мм	Тривалість обробки, с	Концентрація особин, дм ³		Ступінь інактивації, %
		вихідна	кінцева	
0,2	0,17	$3,1 \cdot 10^5$	0	100
0,2	0,17	$3,1 \cdot 10^6$	0	100
0,5	0,17	$2,3 \cdot 10^5$	0	100
0,5	0,17	$3,8 \cdot 10^6$	Одиничні особини	> 99,9
0,7	0,17	$2,3 \cdot 10^5$	Те ж	> 99,9
0,7	0,17	$3,1 \cdot 10^6$	$10:10^2$	> 99,9

Рециркуляційний режим (табл. 2): для імітації багатоступеневого очищення або збільшення дози опромінення вода пропускала через зону розряду повторно (від 1 до 4 рециклів). Після кожного циклу відбиралися проби для мікробіологічного аналізу.

Таблиця 2. Вплив ННТП на виживання мікроорганізмів від кількості рециклів оброблюваного розчину

Кількість рециклів	<i>Bacillus subtilis</i>		Коліфаги		<i>Pseudomonas putida</i>	
	$C_{\text{поч}}$	$C_{\text{кін}}$	$C_{\text{поч}}$	$C_{\text{кін}}$	$C_{\text{поч}}$	$C_{\text{кін}}$
	особ./дм ³		особ./дм ³		особ./дм ³	
1	$4,1 \cdot 10^2$	Одиничні особини	$8,0 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0
	—	—	$2,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	Одиничні особини
2	$4,1 \cdot 10^2$	0	$8,0 \cdot 10^2$	Одиничні особини	$4,0 \cdot 10^4$	0
	—	—	$2,0 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^1$	$4,0 \cdot 10^5$	Одиничні особини
3	$3,7 \cdot 10^5$	Одиничні особини	$8,0 \cdot 10^2$	0	$1,5 \cdot 10^6$	0
	—	—	$2,0 \cdot 10^6$	Одиничні особини	—	—
4	$3,7 \cdot 10^5$	0	$2,0 \cdot 10^6$	0	—	—

Визначення кількості життєздатних мікроорганізмів проводилося методом прямого посіву на диференціально-діагностичні середовища (середовище Ендо для *E. coli*, м'ясо-пептонний агар для загального мікробного числа).

Розрахунок ступеня інактивації (Z , %) проводився за формулою:

$$Z = \frac{C_{\text{вих}} - C_{\text{кін}}}{C_{\text{вих}}} \cdot 100,$$

де $C_{\text{вих}}$ та $C_{\text{кін}}$ — вихідна та кінцева концентрації мікроорганізмів (КУО/дм³) відповідно.

Експериментальна частина роботи виконана на базі кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету.

У реактор діаметром 30 мм через форсунку з витратою рідини 30 дм³/год на внутрішню стінку реактора, виготовлену з діелектрика і який містить кільцевий катод, подавали розчин у вигляді плівки товщиною $5 \cdot 10^{-4}$ м. У середині реактора та в накопичувальному резервуарі підтримували тиск від 4 до 7 Па. У просторі між кільцевим анодом, виготовленим із харчового алюмінію та який знаходиться всередині реактора, в зоні розташування катода, задавали напругу ланцюга 2000—2500 В. Товщину плівки регулювали шляхом застосування реакторів різного діаметру. Такий підхід дозволяв зберігати постійну швидкість руху та незмінний об'єм рідини, яка обробляється за одиницю часу. Застосування форсунок з різною витратою рідини дало можливість вивчити вплив постійного потоку активних частинок при різних товщинах рідини, що досліджується. Відстань між електродами не перевищувала 10^{-2} м. У момент досягнення рідиною анодно-катодного простору в реакторі напруга падала до 600—700 В і в ланцюзі виникав струм тієї чи іншої величини, що залежить від спочатку заданого опору ланцюга. При цьому вплив нерівноважної низькотемпературної плазми на досліджувані рідини в стаціонарному та плівковому режимах має скоріше кількісні, ніж якісні відмінності. Так, наприклад, об'ємна густина струму в стаціонарному осередку — 3 А/дм³, тоді як у плівковому режимі ця величина досягає 3000—4500 А/дм³. Враховуючи, що потужність ультрафіолетового випромінювання в першому наближенні можна вважати пропорційно залежною від величини струму, що виникає в ланцюзі, то при рівних відстанях від поверхні анода до розчину питома потужність випромінювання, віднесена до одиниці об'єму рідини, також підвищиться на 2—3 порядки.

Теплова дія в умовах стаціонарного та плівкового режимів ННТП також нерівнозначна. При стаціонарному режимі тепловому удару піддаються мікроорганізми, які конвективним рухом вносяться до поверхневого шару зони впливу плями розряду, що тліє. Величина струму в реакторі періодичної дії в 10 разів менша, ніж у проточному, а тривалість його впливу в середньому в 1500 разів більша. З іншого боку, в реакторі періодичної дії оброблюваний об'єм рідини в 150 разів більше, і система охолоджується в результаті електролізу, при цьому сумарний стрибок температури розчину не перевищує 5 градусів.

Дійсно, розрахунок джоулевого тепла (Q), що виділяється при нерівноважній низькотемпературній плазмі:

$$Q = 0,86 \cdot I \cdot t \cdot \left(V + \frac{\Delta H}{2 \cdot 23,03} \right),$$

у плівковому режимі течії рідини дорівнює 55 Дж, тоді як при періодичному — 16,5 кДж. Якщо врахувати величини обсягів рідин, на які припадають наведені вище величини джоулевого тепла, то останні повинні нагріватися відповідно на 23 і 150 °С. Встановлено, що проведення ННТП можливе лише при відведенні тепла, яке виділяється, із зони реакції. Враховуючи, що основний стрибок потенціалу фіксується поблизу поверхні розділу фаз газове середовище/рідина, і перенесення енергії активними частинками відбувається на відстані не більше 10^{-4} м, то термічному впливу (80—90 °С) піддається не менше 20 % оброблюваної рідини у плівковому режимі. У стаціонарному режимі впливу того ж чинника піддаються лише мікроорганізми, які потрапляють у зону плями тліючого розряду внаслідок конвективного руху рідини.

Синхронно з термічним впливом реалізується декомпресійний ефект зниження тиску з $100\text{—}10^3$ до $7\text{—}14$ кПа. Якщо врахувати, що у цей проміжок часу (відповідно до закону Фарадея) на катоді виділяється певна кількість водню, а на межі розділу фаз рідина/газ — кисню, плівку рідини можна характеризувати як киплячий шар. Таким чином, незважаючи на зовнішню схожість процесів, що відбуваються при стаціонарному та плівковому режимах дії ННТП, отримані дані можуть докорінно відрізнитися.

Електромагнітне випромінювання, що генерується ННТП у плівковому режимі, спричиняє зміну іонної проникності клітинних мембран (ефект електропорації). Це дозволяє досягти синергізму при поєднанні плазмової обробки з хімічними дезінфектантами, суттєво підвищуючи їхній летальний та мутагенний вплив. Глибина ефективного проникнення вищезгаданих випромінювань (УФ-спектру та активних часток) у товщу води становить $2 \cdot 10^{-4}\text{—}5 \cdot 10^{-4}$ м (0,2—0,5 мм). Ці межі були визначені експериментально шляхом порівняльного аналізу ступеня інактивації мікроорганізмів при різній товщині рідкої плівки: встановлено, що при товщині 0,2 мм досягається 100% інактивації *E. coli*, тоді як при збільшенні шару до 0,7 мм ефективність знижується через ефект екранування.

Враховуючи, що у плівковому режимі тривалість перебування рідини в активній зоні реактора становить 0,17 с (що розраховується за швидкістю потоку та геометрією електродів), взаємодія розряду з клітиною відбувається поетапно. Тривалість цих етапів визначалася згідно з класичними часовими шкалами радіобіології та плазмохімії [1]:

- перший етап — фізичний (триває 10—16 с), в результаті нього відбувається іонізація та збудження молекул, що вступили у взаємодію з потоком активних частинок, які утворилися у газовій фазі;

- другий етап — фізико-хімічний (триває 10—11 с), пов'язаний з утворенням вільних радикалів. Тривалість анігіляції вільних радикалів із молекулами навколишньої субстанції, у тому числі й молекулами клітинних організмів, становить $10^{-6}\text{—}10^{-3}$ с. Порівняння даної величини з часом перебування порції рідини, що обробляється, показує, що цього часу цілком достатньо, аби клітинні організми могли отримати летальну дозу випромінювання;

- третій етап — біологічний, пов'язаний з репарацією ушкоджень клітинних культур, в залежності від отриманої дози випромінювання триває до 10 год.

У табл. 1 представлені результати впливу товщини шару на кишкову паличку при наступних постійних величинах параметрів: $U = 650$ В, $I = 1$ А, $P = 7$ кПа, відстань між анодом і катодом — 10^{-2} м.

Слід зазначити, що залежно від того, як досягається задана товщина шару, динаміка загибелі бактерій має різний характер. Так, при зміні товщини шару розчину за рахунок зміни діаметра реактору період часу, необхідний для досягнення певного відсотка загибелі бактерій, більше, ніж при цій же товщині шару, одержаній шляхом використання форсунки заданої продуктивності.

При максимальній товщині плівки рідини, відсоток бактерій, що виживають, також трохи вище. Спостережувані явища цілком зрозумілі, якщо врахувати, що щільність потоку УФ-випромінювання та активних частинок, а також питомі щільності струму на поверхнях межі розділу фаз із зміною радіуса реактора змінюються пропорційно.

У табл. 2 представлені результати експериментів з інактивації різних мікроорганізмів, що зазнали дії ННТП, в залежності від кількості рециклів оброблюваного розчину, за тих же умов ведення процесу, що й у табл. 1.

При високих концентраціях мікроорганізмів (близько десятків і сотень тисяч на 1 дм³ розчину) тривалість експозиції, як видно з даних табл. 2, необхідно збільшувати. Найбільш стійкими з досліджених мікроорганізмів до впливу ННТП виявилися коліфаги. Тут бактерицидний ефект відчутний лише при трьох-чотириразовому проходженні рідини, що обробляється, через зону реакції.

Випромінювання, що виникають під час генерації ННТП, іонізують молекули води з утворенням активних вільних радикалів (зокрема $\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$, $\text{O}_2\cdot$). Ці частинки мають високу реакційну здатність і атакують молекули, що містять подвійні зв'язки (насамперед ліпіди клітинних мембран та фрагменти ДНК), викликаючи їх деструкцію та неминучу загибель клітин.

Такий непрямий (опосередкований) вплив, зумовлений продуктами радіолізу води, становить близько 85% від сумарної біологічної дії іонізуючого випромінювання. Дане співвідношення є класичним для радіобіології та визначається експериментально-розрахунковим методом: шляхом порівняння виживаності мікроорганізмів у «сухому» стані (де діє лише пряме випромінювання) та у водному середовищі, а також із застосуванням акцепторів вільних радикалів.

Разом із радіаційно-хімічним руйнуванням, вагомий внесок у дезінфекцію води за допомогою ННТП вносять також ультрафіолетове опромінення, сильні локальні електричні поля та електрохімічні процеси, що створює синергетичний ефект і забезпечує високу швидкість знезараження».

Висновки

1. Досліджено закономірності антимікробної дії нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) в плівковому режимі та встановлено її дезінфікуючий ефект, який дозволяє здійснювати знезараження води від патогенних мікроорганізмів.

2. Встановлено, що найбільш стійкими з досліджених видів мікроорганізмів до впливу ННТП виявилися коліфаги — для досягнення бактерицидного ефекту необхідне три—чотириразове проходження оброблюваної рідини через зону реакції.

3. Результати проведених досліджень зі знезараження питної і стічної води під дією ННТП свідчать про те, що води, які містять хвороботворні бактерії, після обробки упродовж 4—5 хв. досягають якості, яка відповідає санітарно-гігієнічним вимогам згідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Список використаної літератури

1. Malajowicz J., Khachatryan K. Properties of water activated with low-temperature plasma in the context of microbial activity. *Beverages*. 2022. Vol. 8, No 4. P. 63–69.
2. Bourke P., Ziuzina D., Han L. Microbiological interactions with cold plasma. *J. Appl. Microbiol.* 2017. Vol. 123. P. 308–324.
3. Pater A., Zdaniewicz M., Satora P. Application of water treated with low-temperature low-pressure glow plasma (LPGP) in various industries. *Beverages*. 2022. Vol. 8, No 2. P. 8–17.
4. Du Zh., Lin X. Research progress in application of low-temperature plasma technology for wastewater treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. P. 18–25.

5. Cheng H., Ye Q.Z. Influential factors on degradation rate of organic contamination in water treatment by discharge plasma. *High Voltage Engineering*. 2007. Vol. 33. P. 150–153.
6. Takeuchi N., Yasuoka K. Review of plasma-based water treatment technologies for the decomposition of persistent organic compounds. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 60. P. 80–89.
7. Krčma F., Simic S., Doskočil L. Generation of silver nanoparticles by the pin-hole DC plasma source with and without gas bubbling. *Plasma Phys. Technol.* 2019. Vol. 6. P. 180–183.
8. Mandal R., Singh A. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends Food Sci. Technol.* 2018. Vol. 80. P. 93–103.
9. Zhou R., Wang P., Xian Y. Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2020. Vol. 53. P. 303–311.
10. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. Vol. 25. P. 53–62.
11. Bradu C., Kutasi K., Magureanu M. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: Generation, chemistry and application in agriculture. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2020. Vol. 53. P. 223–230.
12. Shen J., Tian Y. Bactericidal effects against *S. aureus* and physicochemical properties of plasma activated water stored at different temperatures. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 285–295.
13. Ikawa S., Kitano K., Hamaguchi S. Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application. *Plasma Process. Polym.* 2010. Vol. 7. P. 33–42.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF NON-EQUILIBRIUM LOW- TEMPERATURE PLASMA ON MICROORGANISMS

Abstract

Natural and drinking waters almost always contain various pathogenic microorganisms that are introduced into the water with rain, sewage and can persist in the water for a long time. There is a problem — to bring the state of water according to chemical and biological indicators to a certain level that meets the requirements of current sanitary standards and minimum energy consumption. This work presents the results of studies of the influence of non-equilibrium low-temperature plasma (NNTP) on the disinfection of drinking and wastewater.

It is shown that electromagnetic radiation, which occurs when implementing non-equilibrium low-temperature plasma in the film mode, can have a number of effects that enhance the antimicrobial effect of disinfectants by changing the ionic permeability of the membrane, which, in combination with chemicals, increases lethal and mutagenic effects in water disinfection. The depth of penetration into the water column of the above-mentioned radiation does not exceed $2 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ m, which significantly reduces the impact of these effects in periodic conditions of plasma action. It was established that the most resistant of the studied species of microorganisms to the effects of NNTP were coliphages — to achieve a bactericidal effect, three to four times the passage of the treated liquid through the reaction zone is required.

References

- [1] Malajowicz, J., Khachatryan, K. (2022). Properties of water activated with low-temperature plasma in the context of microbial activity. *Beverages*. 8(4). 63–69.
- [2] Bourke, P., Ziuzina, D., Han, L. (2017). Microbiological interactions with cold plasma. *J. Appl. Microbiol.* 123. 308–324.
- [3] Pater, A., Zdaniewicz, M., Satora, P. (2022). Application of water treated with low-temperature low-pressure glow plasma (LPGP) in various industries. *Beverages*. 8(2). 8–17.
- [4] Du, Zh., Lin, X. (2020). Research progress in application of low-temperature plasma technology for wastewater treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 18–25.
- [5] Cheng, H., Ye, Q.Z. (2007). Influential factors on degradation rate of organic contamination in water treatment by discharge plasma. *High Voltage Engineering*. 33. 150–153.

- [6] Takeuchi, N., Yasuoka, K. (2020). Review of plasma-based water treatment technologies for the decomposition of persistent organic compounds. *Jpn. J. Appl. Phys.* 60. 80–89.
- [7] Krčma, F., Simic, S., Doskočil, L. (2019). Generation of silver nanoparticles by the pin-hole DC plasma source with and without gas bubbling. *Plasma Phys. Technol.* 6. 180–183.
- [8] Mandal, R., Singh, A. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends Food Sci. Technol.* 80. 93–103.
- [9] Zhou, R., Wang, P., Xian, Y. (2020). Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 53. 303–311.
- [10] Bruggeman, P.J., Kushner, M.J., Locke, B.R. (2016). Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.* 25. P. 53–62.
- [11] Bradu, C., Kutasi, K., Magureanu, M. (2020). Reactive nitrogen species in plasma-activated water: Generation, chemistry and application in agriculture. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 53. 223–230.
- [12] Shen, J., Tian, Y. (2016). Bactericidal effects against *S. aureus* and physicochemical properties of plasma activated water stored at different temperatures. *Sci. Rep.* 6. 285–295.
- [13] Ikawa, S., Kitano, K., Hamaguchi, S. (2010). Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application. *Plasma Process. Polym.* 7. 33–42.

Надійшла до редколегії 11.02.2026
Прийнята після рецензування 26.02.2026
Опублікована 26.03.2026