

УДК 628.16

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/25>**Кучук М.С.**

Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О.В.

Дніпровський державний технічний університет

Іванченко А.В.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕРІВНОВАЖНОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

У роботі представлено результати експериментального дослідження ефективності знезараження питної та стічної води за допомогою нерівноважної низькотемпературної плазми. Досліди проводилися на лабораторній плазмовій установці при тиску 0,05–0,1 атмосфер, силі струму 100–150 мА та напрузі 500–1500 В. В основі роботи – визначення впливу нерівноважної низькотемпературної плазми на різні групи бактерій, зокрема, сальмонели, лактозопозитивні кишкові палички, ентерококи та клостридії, які є показниками санітарно-епідемічної безпеки води. Для моделювання реальних умов питну воду штучно контамінували бактеріями в концентрації від 10^3 до 10^6 клітин/мл, а стічні води досліджували як у вихідному вигляді, так і з додаванням патогенних культур *Salmonella infantis* та *S. derby*.

Встановлено, що при впливі плазми протягом 4–6 хв у питній воді досягався повний бактерицидний ефект щодо лактозопозитивних кишкових паличок, грамнегативних бактерій та сальмонел, тоді як спорові форми клостридій зберігали життєздатність, знижуючись лише на 1–2 порядки. Встановлено, що сальмонели гинули вже через 2–3 хв впливу, що свідчить про високу ефективність технології для знешкодження патогенів. У випадку стічних вод також відзначалося значне зниження чисельності лактозопозитивних кишкових паличок, ентерококів і загального мікробного числа на 4 хвилині обробки, однак спорові бактерії залишалися найбільш стійкими.

Дослідження підтвердило перспективність використання нерівноважної низькотемпературної плазми для знезараження води, оскільки метод забезпечує швидке знищення основних епідеміологічно значущих бактерій, включно із сальмонелами, і може застосовуватися як альтернатива традиційним технологіям (хлорування, озонування, ультрафіолетове опромінення). Водночас, отримані результати вказують на необхідність оптимізації режимів роботи плазмових реакторів, зокрема підвищення сили струму та використання плівкових режимів протікання, що дозволить зменшити час обробки та підвищити ефективність щодо спороутворювальних форм мікроорганізмів.

Таким чином, метод нерівноважної низькотемпературної плазми має значний потенціал для впровадження у системи підготовки питної води та попередньої обробки стічних вод, забезпечуючи високий рівень знезараження без утворення токсичних побічних продуктів, характерних для хлорування.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, бактерії, знезараження, питна вода, міські стоки, бактерицидний ефект.

Постановка проблеми. Очищення води є критично важливим для здоров'я людини та стабільності екосистем. Хоча існуючі методи знезараження, такі як хлорування та озонування, ефективні, вони мають певні недоліки, що вимагає пошуку нових, досконаліших підходів.

Хлорування, яке є найпоширенішим методом, може призводити до утворення тригалометанів, які є канцерогенними сполуками. Нові методи, що не використовують хлор, можуть мінімізувати ці ризики, забезпечуючи безпечнішу питну воду. Багато сучасних технологій, наприклад,

УФ-знезараження, потребують значних витрат енергії. Розробка нових, енергоефективних методів є ключовим для зменшення екологічних наслідків та забезпечення стійкого водопостачання в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують різні методи знезараження патогенів у водному середовищі, серед яких найпоширенішими є хлорування та використання його сполук, озонування, ультрафіолетове опромінення, а також поєднання цих способів [1].

Хлорування є найпоширенішим способом знезараження питної води, проте утворення токсичних побічних продуктів стимулювало пошук альтернатив.

Одним із варіантів стала електрохімічна дезінфекція, зокрема безхлорні системи з новими плівками [2]. Попри ефективність, такі методи мають недоліки: високу вартість, короткочасний ефект (потребують комбінування), можливе утворення шкідливих сполук та ризики для здоров'я при перевищенні допустимих концентрацій.

У роботі [3] розглянуто питання переходу від рідкого хлору до застосування натрій гіпохлориту у процесі знезараження питної води. Проаналізовано переваги й недоліки різних дезінфекційних засобів, придатних для цієї стадії водопідготовки. Особливу увагу приділено негативним аспектам використання рідкого хлору: небезпеці під час дозування, транспортування та зберігання, а також утворенню хлорорганічних сполук, серед яких переважають тригалометани (зокрема хлороформ), що характеризуються вираженим мутагенним і канцерогенним впливом. Запропоновано удосконалення існуючої технологічної схеми з метою зменшення кількості побічних продуктів хлорування та покращення органолептичних показників питної води [3].

З'ясовано [4], що використання світлодіодного УФ-випромінювання може слугувати альтернативним способом знезараження питної води в польових умовах. Результативність і безпечність такого методу знезараження визначається низкою чинників: товщиною шару води та її якістю, інтенсивністю та тривалістю впливу УФ-випромінювання, гідродинамічними параметрами, матеріалами й конструкцією обладнання, а також наявністю стабільного джерела живлення та можливістю його підзарядки.

Нова Директива Ради Європейського Союзу (Directive (EU) 2020/2184) щодо якості питної води встановлює вимогу, щоб вода, призначена для споживання людиною, не містила мікроор-

ганізмів, паразитів і речовин, здатних становити потенційну загрозу для здоров'я [5].

Запропоновано [6] принципово нову концепцію забезпечення населення України якісною питною водою, яка базується на використанні автономних комплексів для очищення води безпосередньо в місцях її споживання. Розроблено комплекси водопідготовки індивідуального та колективного призначення, оснащені системами біотестування та аналітичного контролю якості води. Вибір методів очищення водопровідної та іншої води до рівня безпечної здійснюється відповідно до її складу і реалізується на основі блочного принципу, що дає можливість варіювати кількість блоків залежно від характеристик вихідної води. Запропоновані технології та обладнання не мають світових аналогів за собівартістю та комплексністю вирішення завдань. В Україні вже впроваджено понад тисячу блочних установок типу «Вега» та знезаражувальних апаратів «Промінь» у населених пунктах усіх регіонів країни.

Передові окиснювальні процеси активно вивчаються для очищення води від хімічних і біологічних забруднень. Деякі з них уже комерціалізовані, зокрема озонування та ультрафіолетова обробка. Для підвищення ефективності плазмових технологій досліджують конструктивні параметри реакторів і фізичні чинники, що впливають на очищення. Основою плазмової обробки є використання високоактивних гідроксильних радикалів, які окиснюють забруднювачі та запобігають утворенню нових шкідливих сполук [7].

Одним із перспективних альтернативних методів водоочищення є застосування плазмового розряду електричного струму. У процесі розрядів виникає широкий спектр фізико-хімічних ефектів, зокрема утворюється потужне електричне поле, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання, ударні хвилі надлишкового тиску, а також формуються високоактивні хімічні сполуки, такі як радикали ($\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$, $\text{O}\cdot$) та молекули (H_2O_2 , H_2 , O_2 , O_3) [8]. Низькотемпературна плазма здатна ефективно усувати забруднювальні речовини й мікроорганізми, покращуючи якість води за рахунок активності хімічних реакцій, розкладання органічних сполук і стерилізації.

У дослідженні [9] продемонстровано результативність використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) для обробки води та водних розчинів NaCl , AgNO_3 , AgCl з метою одержання продуктів із вираженими дезінфікуючими властивостями. Визначено оптимальні умови плазмохімічного синтезу дезін-

фекційних сполук у водному середовищі. Також вивчено антагоністичний вплив отриманих сполук на низку мікроорганізмів (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* та ін.) у порівнянні з традиційними дезінфікуючими засобами [9].

Відомі дослідження із застосування нерівноважної низькотемпературної плазми для обробки поверхневих вод для побутового використання. У роботі [10] показано, що використання нерівноважної низькотемпературної плазми було ефективним методом знищення бактерій у воді значно з одночасним усуненням запаху, при цьому електропровідність водних розчинів підвищилася.

Таким чином, нерівноважна низькотемпературна плазма є перспективним методом знезараження води, оскільки забезпечує ефективне знищення патогенних мікроорганізмів без утворення шкідливих побічних продуктів. Вона діє завдяки активним формам кисню та нітрогену, має екологічну безпечність, енергоефективність і може застосовуватись для очищення як питної, так і стічної води.

Мета статті – встановити особливості процесу знезараження води із використанням нерівноважної низькотемпературної плазми.

Виклад основного матеріалу. Експериментальне дослідження ефективності знезараження води за допомогою нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) проводили на лабораторній установці з такими параметрами: тиск 0,05–0,1 атмосфер, сила струму 100–150 мА, напруга 500–1500 В. В основі експерименту ставилася задача оцінити, як впливає ННТП на різні види бактерій, зокрема сальмонели, лактозопозитивні кишкові палички (ЛКП), а також клостридії та ентерококи, у питній та стічній воді.

Для дослідження питної води її штучно забруднювали культурами бактерій (від 10^3 до 10^6 клітин/мл), що імітувало реальні умови. Час впливу плазми варіювався від 1 до 15 хвилин. Особливу увагу приділяли споровим формам бактерій (клостридіям), які є стійкими до несприятливих умов. Для отримання спор культуру клостридій попередньо нагрівали до 70 °C протягом 20 хвилин, що знищувало вегетативні форми, але зберігало спори. Для оцінки ефективності використовувалися такі бактеріологічні показники: загальне мікробне число (ЗМЧ); лактозопозитивні кишкові палички (ЛКП); клостридії; ентерококи; сальмонели. Для аналізу води використовували різні живильні середовища, зокрема: м'ясопептонний

агар (для ЗМЧ); середовище Ендо (для ЛКП, бактерії групи кишкової палички (БГКП), грамнегативної мікрофлори); середовище Вільсона-Блера (для клостридій).

Експерименти з міськими стічними водами проводили з використанням дехлорованої питної води з додаванням 0,1% або 1% стічної рідини з міської каналізації та чистої стічної рідини, в яку додавали патогенні бактерії сальмонели (*S. infantis*, *S. derby*).

Вихідні концентрації сальмонел визначали на вісмут-сульфітному агарі або в магнієвому бульйоні. Всі інші бактерії (ЗМЧ, ЛКП, тощо) у стічній воді аналізували без попереднього додавання, а також досліджували стійкі ентерококи на середовищі Сланца-Берті. Через добу інкубації посівів у термостаті при 37 °C проводили підрахунок колоній ЗМЧ, ідентифікацію та облік решти мікрофлори.

Для визначення біохімічної активності культур, виділених з води, використовували диференціальне середовище Клігера. За потреби (для сальмонел насамперед) проводили серологічну діагностику “підозрілих” культур.

Проведено дві серії експериментів із знезараження водопровідної води. Як відомо, основним показником епідемічної безпеки питної води, що визначається Державним стандартом України, є бактерії групи кишкових паличок. При вихідній концентрації цих бактерій в 1 мл від 10^3 до 10^6 повний бактерицидний ефект отримано при 4, 5 і 6 хвилинах впливу нерівноважної низькотемпературної плазми. Практично ті ж результати отримані для ЛКП та грамнегативних бактерій.

Загальне мікробне число за всіх перевірених термінів впливу відзначалося зростання одиничних колоній. Патогенні кишкові бактерії сальмонели, що знаходилися в питній воді в кількості одиниць, десятків і сотень мікробних клітин в 1 мл, гинули через 2 хвилини. Кількість клостридій знижувалася на 1–2 порядки, але, як і за всіх загальноприйнятих видів знезараження води (хлорування, озонування, ультрафіолетове опромінення тощо), крім спеціальних способів для особливих умов, повного бактерицидного ефекту не було відзначено.

На рисунку 1 представлено динаміку загибелі бактерій при різних експозиціях нерівноважної низькотемпературної плазми. Як видно з рисунку, через 3–5 хв впливу настає загибель практично всіх індикаторних груп бактерій у питній воді (ЛКП, БГКП, грамнегативних мікроорганізмів), крім спорових форм клостридій, які практично не ушкоджуються та зберігаються у воді, вегетативні форми при цьому знижуються на два порядки.

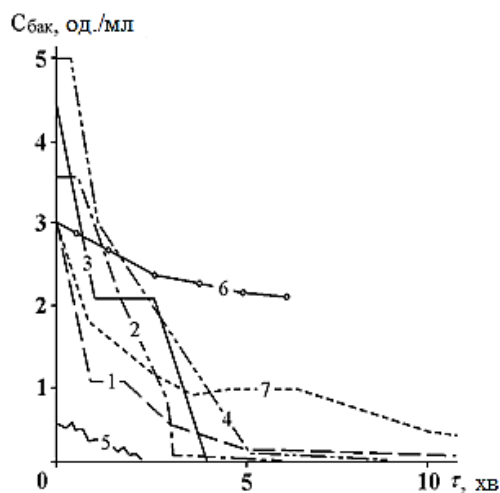


Рис. 1. Динаміка загибелі бактерій у питній воді під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми: 1 – загальне мікробне число; 2 – лактозопозитивні кишкові палички; 3 – бактерії групи кишкової палички; 4 – грамнегативні мікроорганізми; 5 – сальмонели; 6 – спорові форми клостридій; 7 – вегетативні форми клостридій

Сальмонели, які відносяться до патогенних бактерій знешкоджувались протягом 2–3 хв впливу нерівноважної низькотемпературної плазми. Отже, обробка питної води даним методом протягом 4, 5 та 6 хв сприяє забезпеченню стандартної якості питної води.

Вивчення знезаражувального ефекту при обробці стічних вод щодо зазначених вище бактерій також проводили у двох серіях експериментів.

Для оцінки якості стічних вод з відкритих водойм використовували показник лактозопозитивних кишкових паличок. Як в експериментах з питною водою, так і стічною, спостерігалось невелике зниження кількості спорових форм клостридій і більш значне – ентерококів, але їх повна загибель не відзначалася.

Як впливає з рисунку 2, на якому представлена динаміка загибелі бактерій при дії нерівноважної низькотемпературної плазми на стічні води, на 4-й хвилині впливу розряду різко знижується кількість ЛКП – основного бактеріального показника епідеміобезпеки стічних вод. Такий самий ефект був відзначений і в розчинах із сальмонелами. Активне зниження спостерігається для ЗМЧ та ентерококів. Найбільш стабільні рівні зберігали спорові бактерії – клостридії.

Стерилізуючий ефект по відношенню до сальмонел спостерігали при обробці проб, що відповідають за забруднення якості води поверхневих водойм – при часі обробки 4 хв; міської стічної

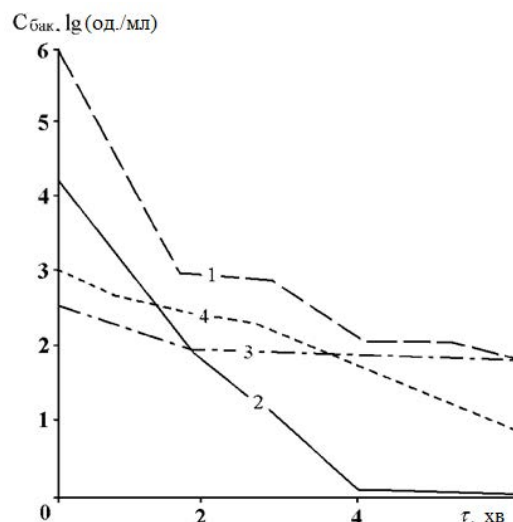


Рис. 2. Динаміка загибелі бактерій у стічній воді під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми: 1 – загальне мікробне число; 2 – лактозопозитивні кишкові палички; 3 – клостридії; 4 – ентерококи

рідини (при концентрації сальмонел 5000 мікробних клітин/мл) – при ідентичній тривалості знезараження.

Слід зазначити, що отримані в ході досліджень обмеження тимчасового інтервалу знезараження вод не є кінцевими. При збільшенні сили струму, що протікає між анодом і оброблюваним розчином, та застосування плівкового режиму протікання рідини час обробки можна суттєво знизити. Останнє можна реалізувати із застосуванням реакторів вертикального типу з розгорнутим розрядом нерівноважної низькотемпературної плазми.

Висновки. Таким чином, узагальнюючи результати проведених досліджень з гігієнічної оцінки ефективності знезараження питних і стічних вод під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми, можна зробити висновок, що питна вода, що містить бактеріальне забруднення на реально можливому рівні, при її обробці 4 хв відповідає ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». Стічна вода після обробки нерівноважною низькотемпературною плазмою протягом 4–5 хвилин досягає нормативного рівня бактеріальної безпеки. При вихідній концентрації лактозопозитивних кишкових паличок від 10^3 до 10^6 клітин/мл, повне знезараження досягалося через 4–6 хвилин обробки, при цьому сальмонели гинули вже через 2 хвилини. Загальне мікробне число знижувалося, але повністю не зникало.

Спорові форми клостридій виявилися стійкими до обробки плазмою, їх кількість практично не змінювалася. Загалом, 3–5 хвилин впливу нерів-

новажної низькотемпературної плазми достатньо для загибелі більшості індикаторних бактерій у питній воді, за винятком спор клостридій.

Список літератури:

1. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Вода та інфекції. Патогени та їх інактивація: монографія. Одеса: Прес-кур'єр. 2023. 584 с.
2. Martinez-Huitle, C.A. and Brillas, E. Electrochemical Alternatives for Drinking Water Disinfection. *Angewandte Chemie International Edition*. 2008. № 47, 1998–2005. <https://doi.org/10.1002/anie.200703621>
3. Груздева О. В., Позднякова У. О., Голуб В. В. Оцінка ефективності процесу знезараження питної води хлорвмісними сполуками в умовах міськводоканалу. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. Vol. 32. No. 1. P. 171–182. doi: 10.15421/jchemtech.v32i1.29157
4. Верголяс М.Р., Іванко О. М., Маврикін Ю.О. Аналіз використання УФ-випромінювання для дезінфекції питної води в надзвичайних ситуаціях. *Український журнал військової медицини*. 2023. № 4 (4). P. 26–32. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.4\(4\)-026](https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.4(4)-026)
5. Бабієнко В.В., Мокієнко А.В. Оцінка ризику в мікробіології води Якість води: біомедичні, технологічні, агропромислові і екологічні аспекти: Збірник матеріалів II Міжнародної науково-технічної конференції. (Тернопіль 24–25 травня 2023 року) / М-во освіти і науки України, Терн. Націон. Техн. Ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. С. 18–19.
6. Гончарук В.В., Байдачний А.М., Кучерук Д. Д., Балакіна М.М. Новітні технології й устаткування для отримання високоякісної питної води. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11. № 1. С. 86–91.
7. Gunnar R. Stratton, Christopher L. Bellona, Fei Dai, Thomas M. Holsen, Selma Mededovic Thagard Plasma-based water treatment: Conception and application of a new general principle for reactor design. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 2015, № 273. P. 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.059>
8. Чарний Д.В., Ярошук Д.А., Пугач О.В. та ін. Знезараження питної води за допомогою плазми електричного розряду. *Геохімія техногенезу*. 2021. № 34. С. 99–104.
9. Скиба М. І., Півоваров, О. А., Макарова, А. К., Воробйова, В. І., Гнатко, О.М. Плазмохімічно оброблена вода та водні розчини для знезараження питної води. *Технічні науки та технології*. 2017. №3(5). С. 240–246.
10. Dung Van Nguyen, Phong Quoc Ho, Toan Van Pham, Tuyen Van Nguyen, Lavane Kim Treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply. *Environ. Eng. Res.* 2019. № 24(3). P. 412–417 <https://doi.org/10.4491/eer.2018.215>

Kuchuk M.S., Kravchenko O.V., Ivanchenko A.V., Kovalenko A.L. WATER DISINFECTION USING NON-EQUILIBRIUM LOW-TEMPERATURE PLASMA

The work presents the results of an experimental study of the effectiveness of disinfection of drinking and wastewater with the help of non -equilibrium low -temperature plasma. The experiments were performed on a laboratory plasma at a pressure of 0.05–0.1 atmospheres, a current of 100–150 mA and a voltage of 500–1500 V. The basis is to determine the impact of non -equilibrium low -temperature plasma on different groups sanitary and epidemic safety of water. For modeling of real conditions, drinking water was artificially contaminated with bacteria in a concentration of 10^3 to 10^6 cells/ml, and wastewater was investigated both in the original form and with the addition of pathogenic crops Salmonella Infantis and S. Derbi.

It was found that when exposed to plasma for 4-6 minutes, a complete bactericidal effect on lactose -positive Escherichia coli, gram-negative bacteria and salmonella was achieved in drinking water; while spore forms of clostridia maintained viability, decreasing by only 1-2 orders of orders. It is established that salmonella died after 2-3 minutes of exposure, which indicates the high efficiency of technology for the neutralization of pathogens. In the case of wastewater; there was a significant decrease in the number of lactose-positive Escherichia coli, enterococci and a total microbial number in 4 minutes of treatment, but spore bacteria remained the most stable. The study confirmed the prospect of using non -equilibrium -temperature plasma for water disinfection, since the method provides rapid destruction of major epidemiologically significant bacteria, including salmonella, and can be used as an alternative to traditional technologies (chlorination, ozonation, ultraviolet). At the same time, the results obtained indicate the need to optimize the modes of operation of plasma reactors, in particular increasing current and use of film modes of leakage, which will reduce the time of processing and increase the efficiency of sporeing forms of microorganisms.

Thus, the method of non-equilibrium low-temperature plasma has considerable potential for the introduction into the system of preparation of drinking water and pre -treatment of wastewater; providing a high level of disinfection without the formation of toxic side products characteristic of chlorination.

Key words: low-temperature plasma, bacteria, decontamination, drinking water, urban drains, bactericidal effect.

Дата надходження статті: 21.09.2025

Дата прийняття статті: 11.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025