

УДК 664.001+579.67

doi: 10.20998/2413-4295.2025.04.08

## ІНАКТИВАЦІЯ СПОРОУТВОРЮВАЛЬНИХ ФОРМ *BACILLUS SUBTILIS* ПРИ ДІЇ ПЕРОКСИДУ ВОДНЮ

Л. І. ШЕВЧУК\*, Х. А. ПОХОДАЙ, Ю. О. ІВАНІК

Кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА  
\*e-mail: liliia.i.shevchuk@lpnu.ua

**АНОТАЦІЯ** Досліджено закономірності інактивації бактерій роду *Bacillus subtilis* під дією водного розчину перексиду водню із використанням експериментального та кінетичного підходів. Показано, що перексид водню є ефективним окисником, який спричинює поступову деградацію клітинної структури мікроорганізмів залежно від концентрації реагента та тривалості експозиції. Експериментальні дослідження підтвердили, що вже за короткий проміжок часу відбувається значне зниження життєздатних клітин, а при оптимальних концентраціях реагента  $0,6 \text{ г/дм}^3$  досягається повне знезараження культури. Застосування різних концентрацій перексиду водню дозволило простежити закономірності процесу й встановити залежність швидкості інактивації від інтенсивності окисної дії та тривалості контакту з мікроорганізмами. Експериментальні дані були апроксимовані кінетичною прямою першого порядку, що дало змогу визначити ефективні константи швидкості руйнування бактерій роду *Bacillus subtilis* та підтвердити прямий зв'язок між концентрацією окисника і швидкістю інактивації клітин. Встановлено, що з ростом концентрації окисника константа швидкості зростає від  $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  до  $11 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , що підтверджує залежність швидкості реакції від кількості активних частинок у системі. Модель показала високу точність апроксимації, що дозволяє використовувати її для прогнозування ефективності знезараження за різних умов експозиції. Дослідження показали, що інтенсивність інактивації прямо пропорційна концентрації перексиду водню та тривалості його дії, що підтверджує можливість регулювання процесу для досягнення повного знищення мікробної популяції. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні надійної основи для оптимізації режимів дезінфекції у харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловостях. Перексид водню демонструє високу ефективність як екологічно безпечний дезінфектант, здатний забезпечити повне знезараження поверхонь, обладнання та рідких середовищ. Використання кінетичного підходу дозволяє прогнозувати кінцевий результат процесу, підвищувати керованість технологічних режимів та мінімізувати ризики виживання мікроорганізмів. Отримані результати підтверджують, що поєднання експериментальних досліджень із кінетичним моделюванням є ефективним методом для визначення оптимальних умов дезінфекції та контролю за процесом знезараження. Це відкриває перспективи для впровадження науково обґрунтованих технологічних рішень у виробництво, забезпечення безпеки продукції та підвищення загальної ефективності санітарно-гігієнічних заходів.

**Ключові слова:** *Bacillus subtilis*; перексид водню; кінетика інактивації; мікробне число; ефективна константа швидкості; ступінь знезараження.

## INACTIVATION OF SPORE-FORMING *BACILLUS SUBTILIS* UNDER THE ACTION OF HYDROGEN PEROXIDE

L. SHEVCHUK, Kh. POKHODAI, Yu. IVANYK

Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The regularities of inactivation of bacteria of the genus *Bacillus subtilis* under the action of an aqueous solution of hydrogen peroxide were studied using experimental and kinetic approaches. It is shown that hydrogen peroxide is an effective oxidant that causes gradual degradation of the cellular structure of microorganisms depending on the concentration of the reagent and the duration of exposure. Experimental studies have confirmed that a significant reduction in viable cells occurs within a short period of time, and at optimal reagent concentrations of  $0.6 \text{ g/dm}^3$ , complete disinfection of the culture is achieved. The use of different concentrations of hydrogen peroxide made it possible to trace the patterns of the process and establish the dependence of the inactivation rate on the intensity of the oxidative action and the duration of contact with microorganisms. The experimental data were approximated by a first-order kinetic line, which made it possible to determine the effective constants of the rate of destruction of bacteria of the genus *Bacillus subtilis* and confirm the direct relationship between the concentration of the oxidant and the rate of cell inactivation. It was found that with an increase in the concentration of the oxidant, the rate constant increases from  $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  to  $11 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , which confirms the dependence of the reaction rate on the number of active particles in the system. The model showed high approximation accuracy, which allows it to be used to predict the effectiveness of disinfection under various exposure conditions. Studies have shown that the intensity of inactivation is directly proportional to the concentration of hydrogen peroxide and the duration of its action, which confirms the possibility of regulating the process to achieve complete destruction of the microbial population. The practical significance of the results obtained lies in the creation of a reliable basis for optimizing disinfection regimes in the food, pharmaceutical, and biotechnology industries. Hydrogen peroxide demonstrates high efficiency as an environmentally safe disinfectant capable of ensuring complete decontamination of surfaces, equipment, and liquid media. The use of a kinetic approach allows predicting the final result of the process, improving the controllability of technological modes, and minimizing the risks of microorganism survival. The obtained results confirm that combining experimental research with kinetic modeling is an effective method for determining the optimal conditions for disinfection and controlling the decontamination process.

*This opens up prospects for the introduction of scientifically based technological solutions into production, ensuring product safety, and increasing the overall effectiveness of sanitary and hygienic measures.*

**Keywords:** *Bacillus subtilis; hydrogen peroxide; inactivation kinetics; microbial count; effective rate constant; degree of disinfection.*

## Вступ

*Bacillus subtilis* – грампозитивна паличкоподібна бактерія розміром приблизно  $0,7\text{--}0,8\times 2\text{--}3$  мкм, яка часто утворює ланцюжки клітин і здатна рухатися завдяки численним джгутикам, що розташовані по всій поверхні (перитрихи). Вона аеробна та за несприятливих умов (високих температур, випромінювання та хімічних впливів) утворює стійкі овальні ендоспори, розміщені в центральній частині клітини, що забезпечує її виживання в екстремальних умовах [1].

На живильних середовищах культивується у вигляді сухих, дрібнозморшкуватих колоній з хвилястим краєм; у фізіологічному відношенні це хемоорганогетеротроф, який розщеплює білки, крохмаль і глікоген. Клітинна оболонка складається з цитоплазматичної мембрани та товстої пептидогліканової стінки, а в цитоплазмі розміщені нуклеоїд з кільцевою ДНК, рибосоми та різноманітні включення (гранули глікогену, ліпідні депо, волютин тощо); бактерія не має мембранних органел еукаріотичного типу. Більшість штамів *B. subtilis* вважаються безпечними для людини і тварин та мають статус GRAS, що пояснює їхнє широке застосування в біотехнології як пробіотик у сільському господарстві та харчовій промисловості [2].

У харчовому виробництві дезінфекція технологічного обладнання, ділянок обробки, контейнерів та упаковки – обов'язкова процедура, яка водночас є однією з найвимогливіших за часом. Вона суттєво впливає на формування якісних характеристик продукту, його біологічну цінність, термін зберігання та безпеку [3]. Саме тому існує багато методів дезінфекції, а дослідники харчової промисловості активно працюють над розробкою нових, високоефективних засобів дезінфекції споживчих продуктів.

Хімічні дезінфектанти для обладнання та контейнерів досить ефективні, якщо суворо дотримуватися концентрацій, але існує ризик потрапляння залишків дезінфектанту у їжу або корозії обладнання. Найчастіше використовують хлорвмісні агенти, амонійні сполуки та пероксидні речовини. Пероксидні засоби (на основі перекису водню ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )) – актуальний напрям, адже перекис розкладається до безпечних продуктів – води й кисню. Він має широкий антимікробний спектр дії: коліформи, стафілококи, стрептококи, пліснява тощо. Перекис водню можна застосовувати для дезінфекції обладнання з нержавіючої сталі, алюмінію, пластику, гуми, дерева й інших матеріалів. Типово використовують 0,05–3 % розчин при 40 °C протягом 10–30 хв. У деяких випадках, наприклад, для стерилізації упаковки, застосовують концентровані розчини (до 30–35 %). У промисловості використовують перекис від 20 до 60 % [3,4].

Дезінфекція води та стічних вод є ключовим елементом забезпечення санітарної безпеки і профілактики поширення патогенів. Перекис водню високо ефективний і екологічно безпечний окисник, який мінімізує ризик залишків хімічних речовин у оброблювальному середовищі [5]. Експериментальні дані показують, що  $\text{H}_2\text{O}_2$  здатен інактивувати як вегетативні форми бактерій, так і їх спори, що робить його перспективним засобом для очищення питної та промислової вод.

Головна антимікробна дія перекису водню зумовлена його окисною активністю. При розкладанні під дією мікробних чи тканинних пероксидаз він виділяє кисень, який окиснює сульфгідрильні та гідроксильні групи білків і ліпідів, що призводить до загибелі мікроорганізмів [5].

Дослідження показує, що рамноліпідні біосурфактанти змінюють ліпідний склад мембрани *Bacillus subtilis*, знижуючи її стабільність та підвищуючи проникність. Такі зміни істотно послаблюють здатність клітини протистояти дії агресивних хімічних агентів [6]. Порушення структури мембран, спричинене біосурфактантами, є ключовим чинником підвищення чутливості *Bacillus subtilis* до антимікробних сполук. Це узгоджується з механізмом дії перекису водню, який також руйнує мембранні ліпіди та призводить до прискореної інактивації клітин і спор [7,8].

## Мета роботи

Метою роботи є дослідження впливу різних концентрацій перекису водню на інактивацію спороутворювальних форм *Bacillus subtilis* для визначення оптимальних умов знезараження та підвищення ефективності процесів мікробіологічного очищення, що є актуальним завданням сучасних технологій.

## Виклад основного матеріалу

У дослідженні застосовували лабораторний штам *Bacillus subtilis*, культивування якого здійснювали на м'ясо-пептонному агарі, що забезпечував стабільний ріст та відтворюваність морфологічних ознак культури. Первинний бактеріальний матеріал піддавали стандартизованій процедурі приготування серійних розведень, яка гарантує формування ізольованих колоній та дозволяє коректно оцінювати кількісний склад популяції. Усі маніпуляції з бактеріальною суспензією виконували відповідно до вимог мікробіологічної безпеки з обов'язковим включенням негативних та методичних контролів.

Для оцінки впливу окисника під час експозиції періодично відбирали проби досліджуваного середовища та готували їх розведення. Отримані суспензії висівали на м'ясо-пептонний агар у чашки Петрі до і після дії окисника, тоді як контролем

служували проби, відібрані до початку експозиції. Інкубацію висівів проводили протягом 48 год за температури 37 °С. За кількістю колоній, що вирости на поживному середовищі, визначали зміни життєздатності клітин та здійснювали висновки щодо інтенсивності руйнування мікроорганізмів під впливом окисника [9].

Після завершення інкубації фіксували сформовані колонії та проводили їх морфологічну оцінку. Для мікроскопічного аналізу готували мазки з поверхні колоній, які піддавали фіксації та подальшому забарвленню основним фуксином. Це забезпечувало отримання контрастного зображення клітин, дозволяло оцінити стан клітинної оболонки, однорідність морфотипів та можливі структурні порушення [10].

Кількісну характеристику росту встановлювали шляхом підрахунку одиниць формування колоній (CFU) з поданням результатів у супроводі відповідних статистичних параметрів. Усі етапи дослідження виконували відповідно до чинних нормативів біобезпеки та стандартів роботи з мікроорганізмами непатогенної групи ризику.

### Обговорення результатів

Для оцінки ефективності впливу перексиду водню на життєздатність *Bacillus subtilis* проведено дослідження зміни мікробного числа (МЧ) за різних концентрацій окисника.

Аналіз результатів мікробного числа під дією окисника наведено в табл. 1. При збільшенні часу обробки спостерігається різке зменшення МЧ при усіх досліджуваних концентраціях перексиду водню.

Таблиця 1 – Залежність МЧ від часу при різних умовах експерименту

| N<br>п/п | Час, с | МЧ · 10 <sup>2</sup> , КУО/см <sup>3</sup> |                         |                            |
|----------|--------|--------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
|          |        | C=0,15<br>г/дм <sup>3</sup>                | C=0,3 г/дм <sup>3</sup> | C=0,6<br>г/дм <sup>3</sup> |
| 1        | 0      | 720                                        | 720                     | 720                        |
| 2        | 300    | 210                                        | 170                     | 96                         |
| 3        | 600    | 76                                         | 31                      | 1                          |
| 4        | 900    | 5                                          | 0                       | 0                          |

На рис. 1 зображено залежність мікробного числа від часу при дії різних концентрацій перексиду водню. Графік ілюструє характерну тенденцію зниження МЧ у часі, що відображає вплив концентрації H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> на інтенсивність перебігу процесу окисної деструкції мікроорганізмів.

З даного рис. 1 спостерігаємо, що за перші 5 хв, мікробне число під дією окисника при C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)=0,15 г/дм<sup>3</sup>, значне зниження значень МЧ на 51000 КУО/см<sup>3</sup> порівнюючи з початковим показником МЧ=72000 КУО/см<sup>3</sup>. Так, відбувається зменшення мікробного числа під дією перексиду водню на 10-тій хв, який становив 7600 КУО/см<sup>3</sup>. Через 15 хв обробки загальне мікробне число при дії окисника знизилася до 500 КУО/см<sup>3</sup>.

При концентрації 0,3 г/дм<sup>3</sup> протягом наступних 5 хв відбувається значне зменшення МЧ при дії H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> на 55000 одиниць, а точніше від 72000 КУО/см<sup>3</sup> до

17000 КУО/см<sup>3</sup>. Впродовж 10 хв темпи руйнування МЧ знизились ще більше, до 3100 КУО/см<sup>3</sup>. Подальша дія окисника протягом 15 хв дозволяє повністю знезаразити досліджуваний зразок.

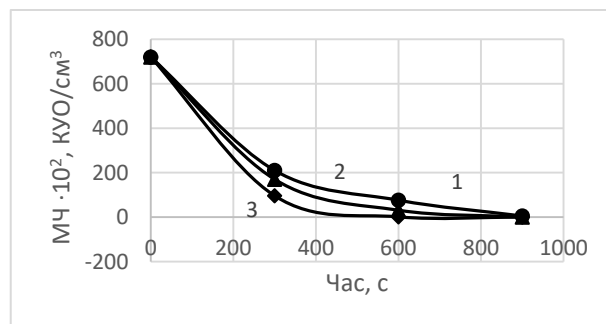


Рис. 1 – Залежність МЧ від часу при різних концентраціях перексиду водню: 1 – C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)=0,15 г/дм<sup>3</sup>, 2 – C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)=0,3 г/дм<sup>3</sup>, 3 – C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)=0,6 г/дм<sup>3</sup>

У ході дослідження було вивчено вплив розчину перексиду водню при концентрації 0,6 г/дм<sup>3</sup> на зміну мікробного числа залежно від тривалості експозиції. Порівнюючи із попередніми зразками, вже через 5 хв обробки МЧ знизилася до 9600 КУО/см<sup>3</sup>, що свідчить про зменшення кількості життєздатних мікроорганізмів більш, ніж у сім разів. Подальше збільшення часу призводило до ще більш інтенсивної інактивації: через 10 хв мікробне число становило лише 100 КУО/см<sup>3</sup>, а після 15 хв було зафіксовано повну відсутність мікроорганізмів.

Паралельно із визначенням МЧ проводили розрахунок ефективної константи швидкості руйнування бактерій роду *Bacillus subtilis*. Спрямлення прямих у напівлогарифмічних координатах підтверджує, що процес руйнування *Bacillus subtilis* можна описати кінетичним рівнянням першого порядку. Встановлені коефіцієнти апроксимації у діапазоні 0,94–0,95 визначають рівень точності експерименту.

Визначення ефективної константи швидкості руйнування бактеріальних клітин проводили за кінетичними рівняннями шляхом інтегрування [11]:

$$\ln \frac{C}{C_{A0}} = -kt, \quad (1)$$

де  $k$  – ефективна константа швидкості (с<sup>-1</sup>);  $C_{A0}$  – початкове значення МЧ (КУО/см<sup>3</sup>);  $C$  – поточне значення МЧ (КУО/см<sup>3</sup>).

Ефективна константа швидкості руйнування бактерій роду *Bacillus subtilis* при концентрації перексиду водню 0,15 г/дм<sup>3</sup> становить  $5,3 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>, а при C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) = 0,3 г/дм<sup>3</sup> відповідно  $7,1 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. З ростом концентрації C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) = 0,6 г/дм<sup>3</sup> зростає ефективна константа швидкості руйнування бактеріальних клітин і становить  $11 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>, що у 2,1 рази більше від ефективної константи при концентрації C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) = 0,15 г/дм<sup>3</sup>. Порівнюючи значення ефективних констант швидкостей руйнування бактерій роду *Bacillus subtilis* при різних концентраціях перексиду водню, встановлено, що оптимальною для швидкої і

ефективної інактивації мікроорганізмів  $\epsilon$   $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup>. Вища концентрація пероксиду водню сприяє більшому утворенню активних молекул на одиницю об'єму і прискорює руйнування клітин, що гарантує коротший час обробки порівняно з іншими досліджуваними зразками.

Таблиця 2 – Зведена таблиця коефіцієнтів апроксимації та ефективних констант швидкостей руйнування *Bacillus subtilis*

| $C(H_2O_2)$ , г/дм <sup>3</sup> | Коефіцієнт апроксимації, $R^2$ | Ефективна константа швидкості, $k \cdot 10^3, c^{-1}$ |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0,15                            | 0,94                           | 5,3                                                   |
| 0,3                             | 0,95                           | 7,1                                                   |
| 0,6                             | 0,95                           | 11                                                    |

Для оцінки ефективності процесу очищення розраховано ступінь знезараження бактеріальних клітин за формулою:

$$D_d = 100 - (MЧ \cdot 100 / MЧ_0), \quad (2)$$

де  $MЧ_0$  – початкове значення мікробного числа у вихідній воді, КУО/см<sup>3</sup>;  $MЧ$  – поточне значення мікробного числа у воді, КУО/см<sup>3</sup> [12].

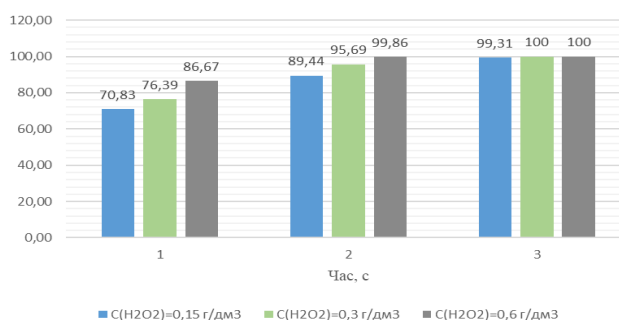


Рис. 2 – Залежність ступеня знезараження *Bacillus Subtilis* від часу при різних концентраціях пероксиду водню

На рис. 2 наведено залежність ступеня знезараження мікроорганізмів від часу експозиції для трьох концентрацій пероксиду водню:  $C(H_2O_2) = 0,15$  г/дм<sup>3</sup>;  $C(H_2O_2) = 0,3$  г/дм<sup>3</sup> та  $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup> за початкового мікробного числа 72000 КУО/см<sup>3</sup>.

Через 5 хв експозиції ступінь знезараження становив 70,83% при  $C(H_2O_2) = 0,15$  г/дм<sup>3</sup>, 76,39% при  $C(H_2O_2) = 0,3$  г/дм<sup>3</sup> та 86,67% при  $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup>. Вже на початковому етапі збільшення концентрації пероксиду водню до 0,3 г/дм<sup>3</sup> забезпечує приріст  $D_d$  на 15,84 % порівняно з 0,15 г/дм<sup>3</sup>, що приблизно у 1,22 рази вище, а порівняно з 0,6 г/дм<sup>3</sup> – на 10,28 %.

На 10-й хв спостерігається подальше зростання ефективності:  $D_d$  становить 89,44% при  $C(H_2O_2) = 0,15$  г/дм<sup>3</sup>; 95,69% при  $C(H_2O_2) = 0,3$  г/дм<sup>3</sup> та 99,86% при  $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup>. Перехід від 5-ти до 10-ти хв забезпечує найбільший приріст для всіх концентрацій, причому при  $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup> досягається майже повне руйнування мікроорганізмів – 99,86%.

Через 15 хв експозиції ступінь руйнування практично досягає 100% для більшості режимів: 99,31%

при  $C(H_2O_2) = 0,15$  г/дм<sup>3</sup>, 100% при  $C(H_2O_2) = 0,3$  г/дм<sup>3</sup> та 100% при  $C(H_2O_2) = 0,6$  г/дм<sup>3</sup>. Це свідчить, що дві вищі концентрації забезпечують повну інактивацію *Bacillus subtilis* протягом 15 хв, тоді як найнижча концентрація дає дещо нижчий результат – 99,31%.

## Висновки

Встановлено, що дія водних розчинів пероксиду водню різної концентрації спричиняє закономірне та концентраційно зумовлене зниження життєздатності клітин *Bacillus subtilis*, що підтверджує ефективність даного окисника як дезінфікуючого агента.

Доведено, що процес інактивації мікроорганізмів можна описати кінетичним рівнянням першого порядку, про що свідчить спрямлення прямих у напівлогарифмічних координатах. Обґрунтовано, що швидкість інактивації мікроорганізмів роду *Bacillus subtilis* прямо залежить від концентрації пероксиду водню: збільшення його вмісту підсилює окисні процеси та скорочує час знезараження.

Експериментально встановлено, що найінтенсивніше зниження мікробного числа відбувається на початковій стадії обробки, після чого процес поступово сповільнюється. Узагальнено, що підвищення концентрації пероксиду водню забезпечує повну інактивацію *Bacillus subtilis* за короткий проміжок часу, що доводить ефективність окисної деструкції як механізму мікробіологічного очищення.

## Список літератури

- Green L. H., Goldman E. *Practical Handbook of Microbiology*. 4th ed. CRC Press, 2021. 795 p. doi: 10.1201/9781003099277.
- Гончар А. *Bacillus subtilis: характеристика біологічних властивостей та особливості мікробно-рослинної взаємодії в ризосфері пшениці озимої*: дис. Київ. 2023. 215с.
- Pivovarov O., Kovaliova O., Koshulko V. Effect of plasma-chemically activated aqueous solutions on the process of disinfection of food production equipment. *Food Science and Technology*. 2022. № 16 (3). P. 61-70. doi:10.15673/fst.v16i3.2392.
- Kovaliova O., Pivovarov O., Koshulko V. Study of hydrothermal treatment of dried malt with plasmochemically activated aqueous solutions. *Food Science and Technology*. 2020. №14 (3). P. 113-121. doi:10.15673/fst.v14i3.1799.
- Gomes A. L. R., Ribeiro-Soares S., Madeira L. M., Nunes O. C., Rodrigues C. S. D. Disinfection of secondary urban wastewater using hydrogen peroxide combined with uv/visible radiation: effect of operating conditions and assessment of microorganism competition. *Water*. 2025. № 17 (4). P. 596. doi:10.3390/w17040596.
- Ou T., Wu Y., Han W., Kong L., Song G., Chen D., Su M. Synthesis of thickness-controllable polydopamine modified halloysite nanotubes (HNTs@PDA) for uranium (VI) removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. P. 127208. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127208.
- De Giani A., Zampolli J., Di Gennaro P. Recent Trends on Biosurfactants With Antimicrobial Activity Produced by Bacteria Associated With Human Health: Different Perspectives on Their Properties, Challenges, and Potential Applications. *Frontiers in Microbiology*. 2021. P. 12. doi:10.3389/fmicb.2021.655150.

8. Su Y., Liu C., Fang H., Zhang D. Bacillus subtilis: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial Cell Factories*. 2020. № 19 (1). doi:10.1186/s12934-020-01436-8.
9. Орябінська Л. Б., Дзигун Л. П., Тітова Л. О. *Загальна мікробіологія і вірусологія*. Лабор. практикум – навч. Посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2022. 121с.
10. Паляниця Л. Я., Березовська Н. І. *Технічна мікробіологія: практикум*. Харків: «Діса плюс», 2024. 166 с.
11. Ковалишин В. Р., Яровий Р. А., Шевчук Л. І. Дослідження впливу температури на кавітаційне очищення стічних вод хімічних та харчових виробництв. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. 2 (24). С.78-83. doi: 10.20998/2413-4295.2025.02.11.
12. Шевчук Л. І., Коваль І. З., Афтаназів І. С. Вплив кавітаційних явищ на процеси руйнування органічних та біологічних забруднень у воді. *Chemistry, Technology and Application of Substances – Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2022. № 5 (1). Р. 42–48.
5. Gomes A. L. R., Ribeirinho-Soares S., Madeira L. M., Nunes O. C., Rodrigues C. S. D. Disinfection of secondary urban wastewater using hydrogen peroxide combined with uv/visible radiation: effect of operating conditions and assessment of microorganism competition. *Water*, 2025, Vol. 17, no. 4, p. 596. doi:10.3390/w17040596.
6. Ou T., Wu Y., Han W., Kong L., Song G., Chen D., Su M. Synthesis of thickness-controllable polydopamine modified halloysite nanotubes (HNTs@PDA) for uranium (VI) removal. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, p. 127208, doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127208.
7. De Giani A., Zampolli J., Di Gennaro P. Recent Trends on Biosurfactants With Antimicrobial Activity Produced by Bacteria Associated With Human Health: Different Perspectives on Their Properties, Challenges, and Potential Applications. *Frontiers in Microbiology*, 2021, p. 12. doi:10.3389/fmicb.2021.655150.
8. Su Y., Liu C., Fang H., Zhang D. Bacillus subtilis: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial Cell Factories*, 2020, Vol. 19, no. 1, doi:10.1186/s12934-020-01436-8.
9. Oryabinska L. B., Dzygun L. P., Titova L. O. *General microbiology and virology*. Laboratory practical - teaching manual Kyiv KPI named after Igor Sikorsky. 2022, 121 p.
10. Palanytsya L. Ya., Berezovskaya N. I. *Technical microbiology: workshop*. Kharkiv: "Disa Plus", 2024, 166 p.
11. Kovalyshyn V. R., Yarovyi R. A., Shevchuk L. I. Research on the influence of temperature on cavitation treatment of wastewater from chemical and food industries. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. 2025, 2 (24), pp. 78-83, doi: 10.20998/2413-4295.2025.02.11.
12. Shevchuk L. I., Koval I. Z., Aftanaziv I. S. Influence of cavitation phenomena on the destruction of organic and biological pollutants in water. *Chem. Technol. Appl. Subst.*, 2022, Vol. 5, no. 1, pp. 42–48.

#### References (transliterated)

1. Green L. H., Goldman E. *Practical Handbook of Microbiology*. 4th ed. CRC Press, 2021, 975 p. doi: 10.1201/9781003099277.
2. Honchar A. *Bacillus subtilis: Characterization of biological properties and features of microbe–plant interaction in the rhizosphere of winter wheat*: Doctoral Dissertation, Kyiv, Ukraine, 2023, 215 p.
3. Pivovarov O., Kovaliova O., Koshulko V. Effect of plasma-chemically activated aqueous solutions on the process of disinfection of food production equipment. *Food Science and Technology*, 2022, 16(3), pp. 61-70, doi:10.15673/fst.v16i3.2392.
4. Kovaliova O., Pivovarov O., Koshulko V. Study of hydrothermal treatment of dried malt with plasmochemically activated aqueous solutions. *Food Science and Technology*, 2020, 14 (3), pp. 113-121, doi:10.15673/fst.v14i3.1799.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Шевчук Лілія Іванівна** - доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри технології органічних продуктів, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-6274-0256, e-mail: liliia.i.shevchuk@lpnu.ua.

**Shevchuk Liliya Ivanivna** - professor, professor of the Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6274-0256, e-mail: liliia.i.shevchuk@lpnu.ua.

**Походай Христіна Анатоліївна** – студент 4-го року навчання кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; ORCID: 0009-0009-8848-7784, e-mail: khrystyna.pokhodai.khr.2022@lpnu.ua.

**Pokhodai Khrystyna Anatoliivna** — 4th-year student, Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0009-0009-8848-7784, e-mail: khrystyna.pokhodai.khr.2022@lpnu.ua.

**Іванюк Юлія Олегівна** - студент 4-го року навчання кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; ORCID: 0009-0000-4994-4609, e-mail: yuliia.ivanyk.khr.2022@lpnu.ua.

**Ivanyk Yuliia Olehivna** — 4th-year student, Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0009-0000-4994-4609, e-mail: yuliia.ivanyk.khr.2022@lpnu.ua.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Шевчук Л. І., Походай Х. А., Іванюк Ю. О. Інактивація спороутворювальних форм bacillus subtilis при дії перексиду водню. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 51-55. doi:10.20998/2413-4295.2025.04.08.

*Please cite this article as:*

Shevchuk L., Pokhodai Kh., Ivanyk Yu. Inactivation of spore-forming bacillus subtilis under the action of hydrogen peroxide. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4(26), pp. 51–55, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.08.

*Надійшла (received) 02.11.2025  
Прийнята (accepted) 19.12.2025*