

НЕГОРУЙ ВІТА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0003-9262-8689>e-mail: negoruyvv@khmnu.edu.ua

ПАРАСКА ОЛЬГА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3803-0382>e-mail: olgaparaska@khmnu.edu.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ АНТИМІКРОБНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ ВИРОБІВ ВІЙСЬКОВО-ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі досліджено ефективність застосування сучасних антимікробних агентів (наночастинок металів, біоПАР) для надання захисних властивостей текстильним матеріалам військово-цивільного призначення в порівнянні із традиційними синтетичними антимікробними агентами. Проаналізовано механізми їхньої взаємодії з мікроорганізмами та проведено оцінку впливу на екологічну безпечність їх застосування.

Ключові слова: антимікробні засоби, опорядження, друк, одяг, що зберігає здоров'я, текстильні вироби військово-цивільного призначення.

NEGORUY VITA, PARASKA OLGA

Khmelnitskyi National University

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF MODERN ANTIMICROBIAL AGENTS FOR THE PROCESSING OF TEXTILE PRODUCTS FOR MILITARY CIVILIAN PURPOSES

Ensuring the microbiological safety of textile materials is a key task in areas where hygiene, durability and resistance to external influences are especially important, in particular in the production of military household, medical, children's and special clothing. Traditionally, synthetic agents are used to impart antimicrobial properties, in particular silver compounds, quaternary ammonium compounds, etc., but their use is often accompanied by environmental risks, toxicity to the environment and the human body, as well as a decrease in efficiency due to the adaptation of microorganisms.

In this context, there is growing interest in the use of biosurfactants – particularly glycolipids, lipopeptides, and phospholipids – produced by various types of microorganisms, as an environmentally safe alternative. This study investigates the effectiveness of bio-based surfactants in providing antimicrobial properties to textile products.

The mechanisms of antimicrobial action of biosurfactants are analyzed – in particular, the destruction of the cell membrane, disruption of metabolic processes and the ability to inhibit biofilm formation, as well as the spectrum of action of biosurfactants in relation to gram-positive, gram-negative bacteria and fungal pathogens.

The comparative characteristic of antimicrobial efficacy of biosurfactants and traditional synthetic antimicrobial agents is presented. The expediency of using biosurfactants in the creation of functional textiles with a long-term antimicrobial effect, corresponding to the principles of circular economy, concepts of green chemistry and sustainable development, has been substantiated.

Keywords: antimicrobial agents, decoration, printing, health-saving clothing, textile products for military civilian purposes.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Антимікробна обробка текстильних матеріалів є актуальною темою в умовах підвищених вимог до гігієнічності, особливо для медичного, захисного та побутового текстилю. Поверхні тканин є сприятливим середовищем для адгезії різноманітних мікроорганізмів, включаючи бактерії, гриби та віруси. Забруднення текстильних матеріалів патогенними мікроорганізмами становить серйозну загрозу для здоров'я людей, виступаючи потенційним джерелом перехресних інфекцій, крім того, мікробна колонізація істотно скорочує строк експлуатації матеріалів за рахунок біодеградації волокон, спричиняє неприємні запахи, плями та знижує їх функціональність та естетичну привабливість. У зв'язку з цим, особливу важливість набуває розробка та впровадження інноваційних, високоефективних способів антимікробної модифікації текстильних матеріалів. Ці рішення повинні не лише забезпечувати потужну та широко спрямовану біоцидну дію проти різних видів мікроорганізмів, але й демонструвати високу стабільність властивостей протягом тривалого періоду експлуатації, зберігаючи ефективність після численних циклів прання, впливу УФ випромінювання та інших зовнішніх факторів. Водночас, критичним аспектом є абсолютна безпечність для здоров'я людини, мінімальний вплив на навколишнє середовище, відповідність сталому розвитку та принципам зеленої хімії.

Аналіз останніх джерел

Сучасні дослідження свідчать про високу ефективність наночастинок металів (Ag, CuO, ZnO, TiO₂) у боротьбі з широким спектром мікроорганізмів. Наприклад, наночастинок срібла активно

вивчають як ефективні антибактеріальні агенти для обробки бавовняних і синтетичних тканин [1, 2]. Цинк оксид та купрум оксид, завдяки своїм фотокаталітичним властивостям і здатності генерувати активні форми кисню, проявляють виражену фунгіцидну та бактерицидну дію. Використання біозаснованих стабілізаторів, таких як рамноліпіди, дозволяє підвищити біосумісність наноматеріалів [3]. Окремі дослідження також вказують на можливість поєднання і антимікробних і гідрофобних властивостей за рахунок комбінацій наночастинок з кремнійорганічними сполуками [4].

Разом із тим, огляди літератури [1, 2, 3, 5, 6] підкреслюють недоліки використання металевих наночастинок, зокрема ризики шкірних реакцій, втрату стабільності після прання, зміну кольору тканин і можливе негативне екологічне навантаження. Крім того, не достатньо даних щодо тривалості дії обробки в умовах підвищеної експлуатації. Це створює необхідність у подальшому вдосконаленні методів фіксації антимікробних компонентів на волокнистій основі.

У зв'язку з цим, зростає інтерес до біоПАР – екологічно безпечних компонентів, які володіють антимікробною активністю, завдяки своїй біорозкладності, низькій токсичності та різноманітним механізмам впливу на мікроорганізми, що потенційно вирішує існуючі проблеми стабільності та безпеки. Сучасні дослідження [7, 8] акцентують увагу на потенціалі біоПАР, як біоцидних агентів із високою ефективністю та біосумісністю. Амфільна будова біоПАР, що складається з гідрофільної головки та гідрофобного хвоста, дозволяє їм ефективно інтегруватися у ліпідний бішар клітинних мембран мікроорганізмів, порушуючи їхню цілісність, збільшуючи проникність та викликаючи лізис клітини [9]. Ця здатність до руйнування мікробних мембран та інгібування утворення біоплівки робить біоПАР особливо цінними [7]. Хоча біоПАР мають низку суттєвих переваг над синтетичними органічними агентами, зокрема у сфері безпеки для людини та довкілля завдяки своїй повній і швидкій біорозкладності та низькій токсичності [10, 11], високі витрати на їх виробництво, зумовлені низькою продуктивністю біопроцесів та вартістю сировини, залишаються ключовим бар'єром.

Метою роботи є: аналіз ефективності дії сучасних антимікробних агентів для текстильних матеріалів, що включає наночастинки металів, синтетичні органічні сполуки, біоПАР, з оцінкою їхньої ефективності, переваг, недоліків та методів фіксації для забезпечення довготривалого антимікробного ефекту.

Виклад основного матеріалу

Надання мікробіологічного захисту текстильним виробам є важливим завданням для багатьох галузей промисловості, зокрема текстильної. Сучасні технології все активніше орієнтовані на впровадження багатофункціональних покриттів, які не лише зберігають споживчі властивості тканин, а й надають їм додаткових властивостей, зокрема антимікробної активності.

Одним з найбільш вивчених та ефективних напрямів антимікробної обробки текстилю є застосування наночастинок металів та їх оксидів. Завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям, включаючи високе відношення площі поверхні до об'єму, здатність генерувати активні форми кисню (ROS), електростатичну взаємодію з клітинними стінками бактерій та порушення мембранного потенціалу, наночастинки металів виявляють виражену антимікробну дію навіть у малих концентраціях. Найчастіше використовують наночастинки аргентуму (Ag), цинку оксиду (ZnO), купрум оксиду (CuO), титану діоксиду (TiO₂), а також комбінації вищезазначених сполук.

Наночастинки аргентуму (Ag) є одними з найефективніших антимікробних агентів. Їх дія ґрунтується на здатності іонів аргентуму зв'язуватись з тиольними групами білків мембрани, спричиняти руйнування клітинної стінки, порушення процесів дихання та реплікації ДНК у мікроорганізмів. У дослідженні Ferrari [1] описано метод безгальванічного нанесення аргентуму на поверхню тканин з бавовни та поліестеру. Виявлено, що отримане покриття має високу антибактеріальну активність проти *Escherichia coli* і *Staphylococcus aureus*, а також протівірусну активність проти SARS-CoV-2. Перевагою методу є його простота, низька вартість і можливість застосування у виробничих умовах.

Цинк оксид (ZnO) демонструє високу ефективність проти широкого спектра бактерій і грибів [5]. Granados [12] зазначають, що цинк оксид, завдяки фотокаталітичним властивостям, здатний продукувати гідроксильні радикали, які викликають окисне пошкодження клітин патогенів. Цинк оксид є перспективним матеріалом з потужними антимікробними властивостями, який виявляє високу активність проти таких патогенів, як *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus*. Їого ефективність пояснюють здатністю наночастинок цинку оксиду розчинятися на іони цинку (Zn²⁺), що мають токсичний вплив на бактерії, а також здатністю частинок проникати в клітини і порушувати їх функціонування. Завдяки своїм антимікробним властивостям цинк оксид широко використовують для покриття текстильних матеріалів, зокрема бавовни, шляхом методів, таких як атомно-шарове осадження або дисперсія в полімерних матрицях. Останні дослідження також зосереджені на екологічно чистих методах синтезу наночастинок цинку оксиду, зокрема через використання рослинних екстрактів, що знижує токсичність процесу та додає додаткові антиоксидантні властивості. Модифіковані тканини з наночастинками цинку оксиду демонструють стійкість до прання і зберігають свої функціональні властивості, що робить їх ефективними для створення антимікробних та ультрафіолетових захисних матеріалів.

Наночастинки купрум оксиду (CuO) мають високу біоцидну активність, зокрема проти грибкових інфекцій. Haripriya et al. [3] описали отримання RL-CuO – наночастинок, покритих біоповверхнево-активною речовиною (рамноліпідами), що були нанесені на тканини з бавовни та поліпропілену. БіоПАР, зокрема рамноліпід (RL), що використовують для покриття наночастинок купрум оксиду, сприяють зниженню мінімальних інгібуючих концентрацій та підвищують антимікробну активність при значно нижчих концентраціях порівняно з використанням окремих компонентів. Це дозволяє розробляти більш безпечні та економічно вигідні матеріали, зокрема для медичних масок, тканин і одягу. Завдяки своїм властивостям, наночастинки купрум оксиду стають важливим інструментом у боротьбі з бактеріями та іншими мікроорганізмами, що зумовлює попит на такі матеріали в текстильній та медичній промисловості. Важливим аспектом є також застосування методів синтезу, таких як гідротермальний метод, який дозволяє отримувати наночастинки з високою стабільністю і контролем над розміром часток, що також впливає на їх ефективність у текстильних виробках.

Дослідження Zhao [4] демонструє застосування наночастинок аргентуму в комбінації з полідиметилсилоксаном (PDMS), нанесених на поліефірну тканину з застосуванням екологічно безпечної водної обробки. Оптимальні властивості досягалися при концентрації PDMS 5 мас. % і вмісті аргентуму 50 мг/кг, що забезпечувало кут змочування 154°, інгібування росту *Escherichia coli* і *Staphylococcus aureus* на рівні 99,99 %. Отримані матеріали зберігали повітропроникність, міцність на розрив, а також стійкість до прання й тертя. Це вказує на виняткову стійкість покриття та можливість його практичного застосування у виробках багаторазового використання.

В одному з досліджень [13] було проведено обробку фарбованих шовкових тканин за допомогою аргентуму та паладію, які використовували як замітники протрави. Результати показали, що зразки з обробленою поверхнею демонстрували високу насиченість кольору та стійкість до прання, потовиділення та світлових впливів. Крім того, зразки показали відмінні показники біоцидної ефективності проти таких патогенів, як *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* та *Candida albicans*, з ефективністю зниження на рівні від 94,13 до 98,27 %.

Основні характеристики антимікробної дії наночастинок металів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика наночастинок металів для антимікробної обробки текстильних виробів

Наночастинки	Механізм дії	Цільові патогени	Переваги	Недоліки
Ag	Руйнування клітинної стінки, зв'язування з тіольними групами, порушення ДНК і дихання	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , SARS-CoV-2	Висока ефективність, стабільність, антивірусна дія	Висока вартість, потенційна токсичність, зміна кольору тканини
ZnO	Вивільнення Zn^{2+} , проникнення в клітину	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Стійкість до прання, УФ-захист, можливість екосинтезу	Можливі шкірні реакції
CuO	Руйнування мембран, блокування метаболічних шляхів, фунгіцидна активність	Гриби, <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Дешевші за срібло, висока ефективність при використанні з біосурфактантами (рамноліпіди)	Може змінювати колір тканини, екотоксичність
TiO ₂	Фотокаталіз, генерування гідроксильних радикалів	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	УФ-активація, довготривалий ефект	Потребує УФ-освітлення для активації
Ag з Pd	Подвійна антибактеріальна дія, також використовуються як протрави при фарбуванні	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Candida albicans</i>	Покращення кольору, висока біоцидна активність	Висока вартість паладію

Проте поряд з перевагами, металеві наночастинки мають низку обмежень. Серед основних – потенційна токсичність при накопиченні в організмі людини, ризики для навколишнього середовища при змиванні з тканин, можливе забарвлення поверхні та висока вартість виробництва. Schneider [6] у

систематичному огляді наголошують про ефективність антимікробних агентів, таких як купрум, аргентум, цинку оксид, наночастинки титану у зменшенні мікробного навантаження та частоти інфекцій, пов'язаних із наданням медичної допомоги, при їх нанесенні на текстильні матеріали. Встановлено, що текстиль, просочений зазначеними речовинами, загалом демонструє кращі антимікробні властивості порівняно зі звичайними матеріалами, однак деякі сполуки (зокрема цинк оксид, аргентум та четвертинні амонієві сполуки) можуть спричиняти шкірні реакції, такі як свербіж, еритема або висип, тоді як купрум, хлоргексидин, хітозан та диметилдидиметилгіддантоїн виявилися менш токсичними для користувачів у клінічних умовах.

Зокрема, з урахуванням як переваг, так і потенційних ризиків використання металевих наночастинок, доцільним є порівняння їх антимікробної ефективності. На рис. 1 наведено порівняльну характеристику впливу різних типів наночастинок металів на мікробну активність, що дозволяє зрівняти їхню ефективність у контексті застосування в текстильній промисловості.

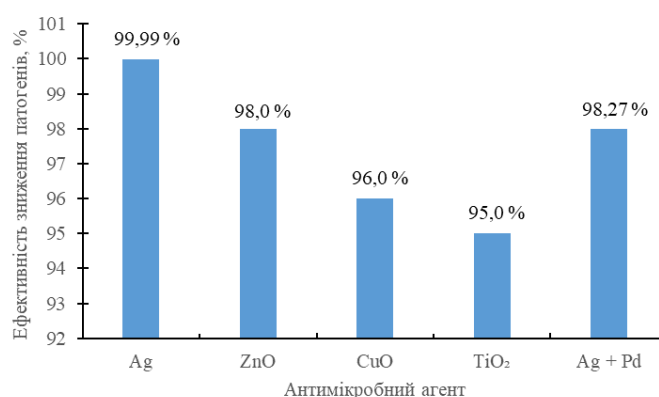


Рис 1. Порівняльна антимікробна ефективність наночастинок металів

Таким чином, металеві наночастинки становлять одну з найперспективніших груп антимікробних агентів для текстильної промисловості, однак їх впровадження має супроводжуватись вивченням безпечності, розробкою ефективних методів фіксації та регуляторними стратегіями щодо обмеження екологічних ризиків.

До синтетичних органічних антимікробних агентів належать хімічні сполуки, які штучно синтезовані в лабораторних умовах та мають виражену біоцидну дію. Найчастіше в текстильній промисловості застосовують Quaternary Ammonium Compounds (QAC), триклозан, полігексаметиленбігуанід (PHMB), йодопохідні, а також похідні ізотіазолінону. Ці речовини забезпечують широкий спектр антимікробної активності та мають високу термічну й хімічну стабільність, що дозволяє використовувати їх у процесах фінішної обробки тканин. Наприклад, QAC ефективні проти великої кількості бактерій, а триклозан, завдяки своїм властивостям, здатний також пригнічувати ріст грибків і вірусів [14].

QAC діють шляхом руйнування клітинних мембран мікроорганізмів, що призводить до втрати осмотичного балансу і загибелі клітини. У дослідженні [15] розроблено ефективну технологію надання бавовняним тканинам стійких антибактеріальних властивостей шляхом ковалентного закріплення кополімеру полі(DMC-co-MA), синтезованого зі [2-(метакрилоїлокси)етил]триметиламоній хлориду (DMC) та метилакрилату (MA). Для забезпечення ефективного зшивання полімеру, поверхню волокон попередньо модифіковано карбоксиметилхітозаном, що сприяє утворенню амідних зв'язків між аміногрупами та ефірними фрагментами кополімеру. Отримане покриття забезпечує високий рівень антибактеріальної активності: при співвідношенні DMC/MA = 100:1 тканина повністю інактивує *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus*, і зберігає понад 98 % активності навіть після 50 циклів прання. При цьому функціональні властивості тканини, зокрема м'якість, водопоглинання та повітропроникність, залишаються практично незмінними.

Триклозан, фенольна сполука з вираженою антисептичною дією, блокує ензими, необхідні для синтезу жирних кислот у бактерій, структурна формула зображена на рис.2. Він ефективний проти широкого спектра бактерій, включаючи метицилінрезистентний *Staphylococcus aureus* (MRSA). Проте використання триклозану викликає занепокоєння через можливу резистентність мікроорганізмів, ендокринні порушення та акумуляцію в навколишньому середовищі. У роботах, присвячених безпеці, відзначено необхідність пошуку менш токсичних аналогів або оптимізації дозування для зменшення ризиків.

Перевагами органічних синтетичних агентів є висока ефективність, стабільність до дії температури та прання, можливість модифікації структури для поліпшення властивостей. Водночас, до недоліків відносять потенційну токсичність, алергенність, небезпеку для водних екосистем, що вимагає дотримання суворих стандартів та обмежень при їх використанні.

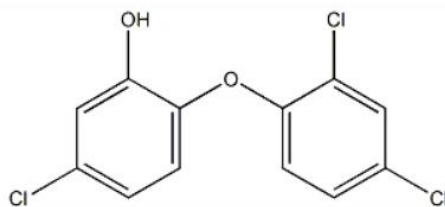


Рис.2 Структурна формула триклозану

У дослідженні [7] акцентована увага на потенціалі біоПАР як антимікробних агентів. Залежно від хімічної природи, ці речовини класифікують на низькомолекулярні та високомолекулярні, рис.3. Перші – зокрема гліколіпіди та ліпопептиди – володіють здатністю до руйнування мікробних мембран, що зумовлює їхню високу антимікробну активність. Високомолекулярні біоПАР, характеризуються здатністю знижувати поверхневий і міжфазний натяг, а також демонструють перспективність у руйнуванні мікробних біоплівкок.

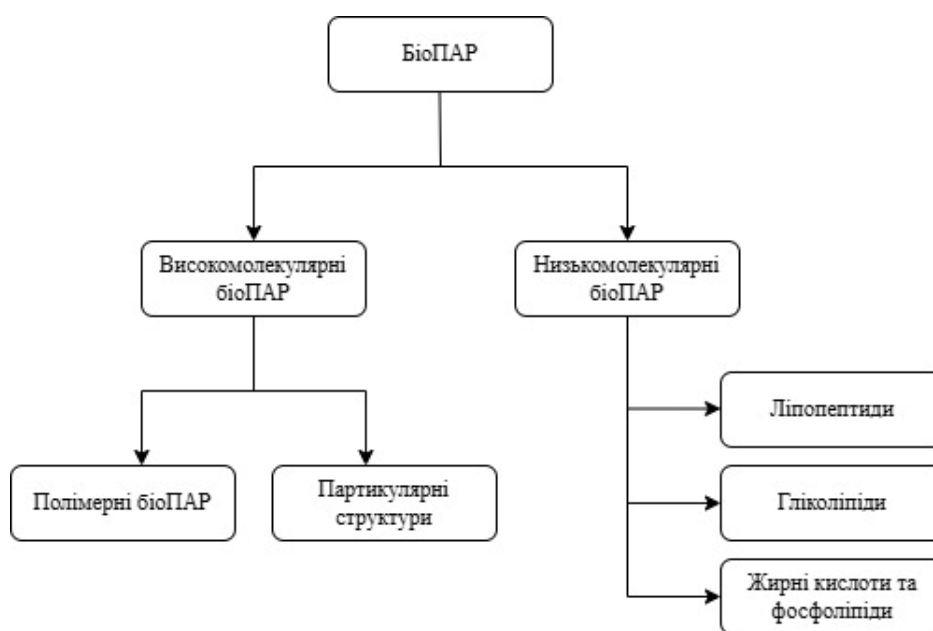


Рис.3 Класифікація біоПАР

Особливий інтерес викликають гліколіпіди, зокрема рамноліпіди та софороліпіди. Рамноліпіди синтезуються мікроорганізмами, зокрема представниками роду *Pseudomonas*, та мають здатність істотно зменшувати поверхневий натяг. Вони мають будову, в якій вуглеводний фрагмент (одна або дві рамнози) формує водорозчинну частину, а жирнокислотні ланцюги (також один або два) утворюють водонерозчинний хвіст; обидві частини поєднані між собою через О-глікозидний зв'язок. Софороліпіди, які продукують певні дріжджові культури, також демонструють поверхнево-активні властивості й варіативність у будові, зокрема щодо форми молекули (лактонна чи кислота) та гідрофобної частини. Обидва типи сполук проявляють потенціал для зменшення міжфазного натягу, що визначає їхню доцільність у різних сферах застосування.

БіоПАР на основі жирних кислот та фосфоліпідів здатні формувати стабільні мікроемульсії, що є важливим для біотехнологічних і медичних процесів. Зокрема, фосфоліпіди, такі як фосфатидилетаноламін, продукуються певними бактеріями і мають високу ефективність у зниженні міжфазного натягу, що сприяє формуванню ліпідних везикул із корисними властивостями.

Такі мікроорганізми, як *Acinetobacter spp.*, виробляють фосфоліпідні везикули, що утворюють медично важливі мікроемульсії. Ліпоамінокислоти, синтезовані сірковідновлювальними бактеріями, також належать до цієї групи біоПАР і демонструють значний потенціал у промисловому застосуванні. На рис. 4 наведена структура пальмітинової кислоти – однієї з типових жирних кислот, що входять до складу біоПАР, які синтезуються мікроорганізмами.

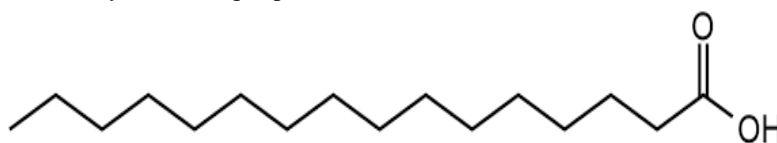


Рис.4 Структура пальмітинової кислоти

Полімерні біоПАР є поверхнево-активними речовинами з високою молекулярною масою, що синтезують різні представники мікробіоти, включаючи *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Halomonas* та *Candida* [7]. Представниками цього класу є такі сполуки, як емульсан, аласан та ліпосан, які демонструють здатність до формування та стабілізації емульсій.

Окремий клас біоПАР становлять поверхнево-активні речовини, що мають партикулярну організацію, зокрема у вигляді сферичних везикул та наночастинок, які утворюються певними мікроорганізмами. Наприклад, деякі штами *Acinetobacter sp.* продукують везикули та фімбрії, у складі яких наявні білки, фосфоліпіди та ліпополісахариди. Ці структури проявляють властивості стабілізаторів мікроемульсій. Завдяки наявності гідрофільних та гідрофобних доменів біоПАР даного типу можуть самостійно організовуватися в упорядковані надмолекулярні структури на межі розділу фаз.

Партикулярні біоПАР здатні утворювати наприклад везикули, при концентраціях, що перевищують критичну концентрацію міцелоутворення (ККМ). Такі структури мають амфіфільну будову: полярна частина найчастіше містить фрагменти амінокислот, пептидів або вуглеводів, тоді як неполярна – залишки жирних кислот. Функціональна активність цих наноструктур, зокрема щодо інгібування утворення біоплівки, є предметом активного дослідження. Так, біоПАР типу рамноліпідів значно зменшують адгезію таких патогенів, як *Listeria monocytogenes*, тим самим запобігаючи колонізації поверхонь і формуванню біоплівкових популяцій.

На відміну від низькомолекулярних біоПАР, полімерні поверхнево-активні агенти, як правило, характеризуються вищою ефективністю в стабілізації емульсій за рахунок утворення щільного захисного шару на межі розділу фаз. Наприклад, емульсан забезпечує стабільну емульгацію вуглеводнів у водному середовищі навіть за низьких концентрацій, що обумовлює його перспективність у біотехнологічних процесах та екологічних застосуваннях [16].

БіоПАР є амфіфільними сполуками, які синтезують різноманітні мікроорганізми, зокрема бактерії, дріжджі та гриби. Їхня унікальна структура, що складається з гідрофільної головки та гідрофобного хвоста, забезпечує здатність до накопичення на міжфазних поверхнях, знижуючи поверхневий та міжфазний натяг [9]. Ця амфіфільність лежить в основі їхньої багатифункціональності, включаючи емульгуючі, піноутворювальні, змочувальні та солубілізуювальні властивості. Механізм антимікробної дії біоПАР значною мірою пов'язаний з їхньою взаємодією з клітинними мембранами мікроорганізмів, схема якої зображена на рис. 5.

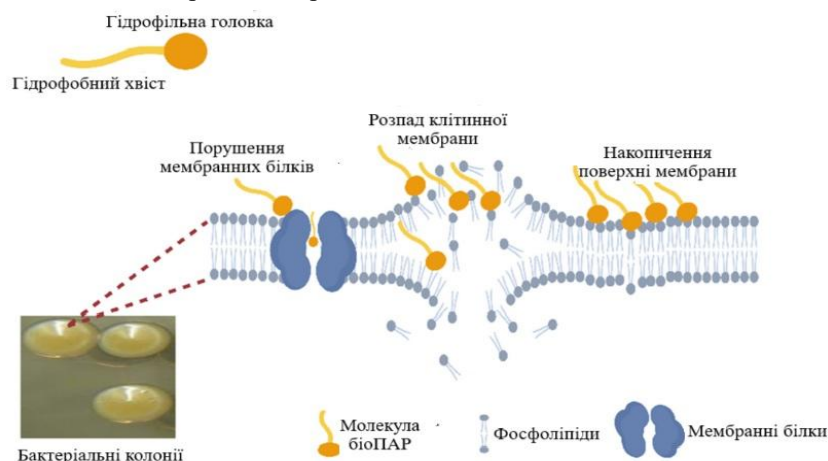


Рис.5. Схема взаємодії біоПАР з бактеріальною клітинною мембраною та зовнішні прояви її продукування бактеріальними колоніями

Механізм антимікробної дії біоПАР є багатограним і переважно спрямований на дестабілізацію клітинних мембран бактерій. Завдяки своїй амфіфільній природі, молекули біоПАР здатні інтегруватися у ліпідний бішар клітинної мембрани, утворений фосфоліпідами. Гідрофобні хвости біоПАР взаємодіють з гідрофобним ядром мембрани, тоді як гідрофільні головки орієнтуються до водного середовища. Ця інтеграція призводить до порушення цілісності мембрани, збільшення її проникності та деполяризації. Окрім прямої інтеграції у ліпідну двошарову мембрану, біоПАР також можуть взаємодіяти з мембранними білками, призводячи до їх денатурації або вивільнення з мембрани, що критично порушує функціонування транспортних систем та ферментних комплексів. Накопичення біоПАР на поверхні мембрани та подальше її розпушення в кінцевому підсумку викликає лізис клітини, витік внутрішньоклітинного вмісту та загибель бактеріальної клітини. Таким чином, біоПАР демонструють потенціал як ефективні біоцидні агенти, що обумовлює їхнє застосування у медичних, фармацевтичних та біотехнологічних галузях.

У дослідженні [11] відзначено зростання попиту на біоПАР, що зумовлене їхніми безпечними для довкілля властивостями, низькою токсичністю та здатністю до біорозкладання. Найвищий попит спостерігають в сегменті мийних засобів, що пояснюють ефективністю біоПАР у нейтральному

середовищі та їх здатністю видаляти гідрофобні забруднення. З-поміж біоПАР найбільш перспективними вважаються гліколіпіди, зокрема рамноліпіди, завдяки високій чистоті та функціональним властивостям. Географічно лідером споживання є Європа, де зростання ринку стимулюється підвищеною екологічною свідомістю. Водночас високі витрати на виробництво залишаються ключовим бар'єром, зумовленим низькою продуктивністю біопроцесів, вартістю сировини та недосконалістю методів очищення, що потребує технологічної оптимізації.

Порівняння синтетичних ПАР і біоПАР показує, що останні мають значно кращі екологічні властивості [10]. Ці речовини, на відміну від традиційних хімічних ПАР, швидко розкладаються в природному середовищі, зокрема у воді та ґрунті, і мають значно меншу токсичність, що робить їх ідеальними для очищення навколишнього середовища. Однак, необхідно враховувати потенційні ризики, пов'язані з патогенністю деяких організмів-продуцентів, що потребує додаткових досліджень для їхнього безпечного використання.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика біоПАР та синтетичних органічних агентів

Критерій	БіоПАР	Синтетичні органічні агенти
Походження	Біологічне (мікроорганізми, ферментація)	Хімічний синтез із вуглеводнів або ароматичних сполук
Біорозкладність	Повна, швидка	Часто низька або середня
Токсичність	Низька, нетоксичні для шкіри й довкілля	Можлива токсичність, алергенність
Екологічність	Висока	Низька або середня

Таким чином, біоПАР мають низку суттєвих переваг над синтетичними органічними агентами, зокрема у сфері безпеки для людини та довкілля. Висока екологічність і біорозкладність біоПАР сприяє перспективам впровадження обробки текстильних виробів військово-цивільного призначення.

У дослідженні [17] зосереджено увагу на застосуванні нових біоцидів тіосульфатної структури, таких як етилтіосульфат (ЕТС), метилтіосульфат (МТС) та алілтіосульфат (АТС), для обробки целюлозовмісних текстильних матеріалів. Встановлено, що зазначені сполуки ефективно пригнічують розвиток мікроорганізмів, не спричиняючи суттєвих змін розривальних характеристик тканин різного волокнистого складу. Це підтверджує перспективність використання тіосульфатних препаратів як антимікробних агентів для збереження функціональних і механічних властивостей текстильних виробів.

У можливості розробки інноваційних текстильних матеріалів з довготривалою антимікробною обробкою дослідники звернули увагу на важливість фіксації антимікробних препаратів [18]. У роботі було визначено склад композиції та технологічні особливості обробки текстильного матеріалу, зокрема вплив полімерного носія та фіксатора на стійкість антимікробної обробки. Окрему увагу приділено розробці опоряджувальної суміші, яка включає карбоксиметильований крохмаль, декаметоксин як бактерицидний препарат та калій йодид для закріплення препарату на тканині. Було проведено дослідження впливу цих компонентів на сорбційні властивості бавовняної тканини, а також оцінено технологічні особливості нанесення обробки одностадійним безперервним способом. Автори показали, що отримані матеріали мають високу антимікробну активність і зберігають свої властивості навіть після багаторазових прань, що підтверджує перспективність запропонованої технології для застосування на опоряджувальних підприємствах.

Висновки

Актуальність досліджень у сфері військово-побутового текстилю обумовлена необхідністю удосконалення властивостей матеріалів, що використовують як для військового одягу так і побутового вжитку. Важливим аспектом є розробка нових методів обробки, які дозволяють значно підвищити якість текстильних виробів спеціального призначення. Наукові дослідження вітчизняних та закордонних вчених вказують на важливість використання нових матеріалів, а також надання їм покращених властивостей шляхом різноманітних методів обробки [19]. Це дозволяє не тільки забезпечити міцність і витривалість матеріалів до екстремальних умов, але й підвищити комфорт та функціональність військового одягу. Подальші наукові пошуки повинні зосередитися на розробці нових технологій обробки, які здатні забезпечити оптимальні характеристики для сучасного військового використання.

Надання мікробіологічного захисту текстильним виробам військово-цивільного призначення є критично важливим завданням, що стимулює розвиток інноваційних антимікробних рішень. Проведений аналіз останніх наукових джерел засвідчує, що наночастинки металів (Ag, ZnO, CuO, TiO₂) та синтетичні органічні агенти (QAC, триклозан), хоча й демонструють високу антимікробну ефективність, мають низку обмежень, включаючи потенційну токсичність для людини та довкілля, ризики втрати стабільності та можливі естетичні зміни матеріалів. У відповідь на ці виклики, біоПАР виступають як перспективна та екологічно безпечна альтернатива, завдяки своїй біорозкладності, низькій токсичності та ефективним механізмам дії, спрямованим на дестабілізацію мікробних мембран та інгібування біоплівки. Незважаючи на вищу вартість виробництва біоПАР, їхні екологічні переваги

роблять їх цінним об'єктом для подальших досліджень. Для забезпечення довготривалого та стабільного антимікробного ефекту на текстильних матеріалах, незалежно від типу застосовуваного біоциду, ключове значення має розробка ефективних методів фіксації активних компонентів на волокнистій основі, зокрема із застосуванням полімерних носіїв та фіксаторів, що сприяє підвищенню стійкості обробки до експлуатаційних навантажень. Таким чином, подальші наукові пошуки у сфері антимікробної обробки текстилю мають бути зосереджені на розробці комплексних та безпечних рішень, що поєднують високу ефективність з екологічною відповідальністю, особливо актуальних для військово-побутового текстилю.

Література

1. Ferrari I.V., Castellino M., Pisani A. та ін. Electroless silver plating on fabrics for antimicrobial coating: comparison between cotton and polyester // *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*. – 2024. – Vol. 22. – Article ID: 22808000241277383. – DOI: <https://doi.org/10.1177/22808000241277383>.
2. Bibi A., Afza G., Afzal Z. та ін. Synthetic vs. natural antimicrobial agents for safer textiles: a comparative review // *RSC Advances*. – 2024. – Vol. 14, № 42. – P. 30688–30706.
3. Haripriya P., Revathy M.P., Kumar M.S. та ін. Biosurfactant-capped CuO nanoparticles coated cotton/polypropylene fabrics toward antimicrobial textile applications // *Nanotechnology*. – 2024. – Vol. 35, № 16. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad1d15>.
4. Zhao Y., Chen K., Zhu J. та ін. Green method for the preparation of durable superhydrophobic antimicrobial polyester fabrics with micro-pleated structures // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, № 6. – Article ID: 1219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29061219>.
5. Suellen Ferro de Oliveira C., Tavará F.K. The impact of bioactive textiles on human skin microbiota // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2023. – Vol. 188. – P. 66–77. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2023.05.004>.
6. Schneider G., Vieira L.G., de Carvalho H.E.F. та ін. Textiles impregnated with antimicrobial substances in healthcare services: systematic review // *Frontiers in Public Health*. – 2023. – Vol. 11. – Article ID: 1130829. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1130829>.
7. Puyol McKenna P., Naughton P.J., Dooley J.S.G. та ін. Microbial biosurfactants: antimicrobial activity and potential biomedical and therapeutic exploits // *Pharmaceutics*. – 2024. – Vol. 17, № 1. – Article ID: 138. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17010138>.
8. Markam S.S., Raj A., Kumar A., Khan M.L. Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste // *Current Research in Microbial Sciences*. – 2024. – Vol. 7. – Article 100266. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100266>.
9. Adu S., Naughton P., Marchant R., Banat I.M. Microbial biosurfactants in cosmetic and personal skincare pharmaceutical formulations // *Pharmaceutics*. – 2020. – Vol. 12, № 11. – Article ID: 1099. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12111099>.
10. Antonioli Júnior R., Poloni J.F., Pinto É.S.M., Dorn M. Interdisciplinary overview of lipopeptide and protein-containing biosurfactants // *Genes*. – 2023. – Vol. 14, № 1. – Article ID: 76. – DOI: <https://doi.org/10.3390/genes14010076>.
11. Ambaye T.G., Vaccari M., Prasad S., Rtimi S. Preparation, characterization and application of biosurfactant in various industries: a critical review on progress, challenges and perspectives // *Environmental Technology & Innovation*. – 2021. – Vol. 24. – Article ID: 102090. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102090>.
12. Granados A., Pleixats R., Vallribera A. Recent advances on antimicrobial and anti-inflammatory cotton fabrics containing nanostructures // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, № 10. – Article ID: 3008. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26103008>.
13. Ahmed H.B., El-Hawary N.S., Mashaly H.M., Emam H.E. End-to-end surface manipulation of dyed silk for perfection of coloration, UV-resistance and biocidal performance // *Journal of Molecular Structure*. – 2024. – Vol. 1305. – Article ID: 137766. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137766>.
14. Islam S.U., Majumdar A., Butola B.S. *Advances in Healthcare and Protective Textiles*. – Amsterdam : Elsevier, 2023.
15. Wang P., Zhang M., Qu J. та ін. Antibacterial cotton fabric prepared by a “grafting to” strategy using a QAC copolymer // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 29. – P. 3569–3581. – DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-978535/v1>.
16. Gayathiri E., Prakash P., Karmegam N. та ін. Biosurfactants: potential and eco-friendly material for sustainable agriculture and environmental safety – a review // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12. – Article ID: 662. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030662>.
17. Мартиросян І.А., Пахолук О.В., Ніколайчук Л.Г. Дослідження механічних властивостей бавовняно-поліестерових тканин з біоцидною обробкою // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2021. – № 5. – С. 209–212.

18. Іщенко О., Сумська О., Смикало К., Фещук Ю., Кучинська Д. Антимікробна обробка текстильних матеріалів // *Технічні науки та технології*. – 2023. – № 4(34). – С. 115–128. – DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-115-128](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-115-128).
19. Ткачук П.В., Півнюк С.В., Ніколайчук Л.Г. Аналіз видів обробок як фактору формування властивостей текстильних виробів, призначених для забезпечення військовослужбовців // *Товарознавчий вісник*. – 2023. – № 1(16). – С. 310–320.
20. Paraska O. Study of the influence of antimicrobial agents on the operational and hygienic properties of cellulose materials / O.Paraska, H.Kovtun, L.Hes, S.Horiashchenko // *Vlakna a textil Journal*. Vol. 29 (2). – 2022. P. 73-78. http://vat.ft.tul.cz/2022/2/VaT_2022_2_8.pdf.

References

1. Ferrari I.V., Castellino M., Pisani A. та ін. Electroless silver plating on fabrics for antimicrobial coating: comparison between cotton and polyester // *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*. – 2024. – Vol. 22. – Article ID: 22808000241277383. – DOI: <https://doi.org/10.1177/22808000241277383>.
2. Bibi A., Afza G., Afzal Z. та ін. Synthetic vs. natural antimicrobial agents for safer textiles: a comparative review // *RSC Advances*. – 2024. – Vol. 14, № 42. – P. 30688–30706.
3. Haripriya P., Revathy M.P., Kumar M.S. та ін. Biosurfactant-capped CuO nanoparticles coated cotton/polypropylene fabrics toward antimicrobial textile applications // *Nanotechnology*. – 2024. – Vol. 35, № 16. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad1d15>.
4. Zhao Y., Chen K., Zhu J. та ін. Green method for the preparation of durable superhydrophobic antimicrobial polyester fabrics with micro-pleated structures // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, № 6. – Article ID: 1219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29061219>.
5. Suellen Ferro de Oliveira C., Tavará F.K. The impact of bioactive textiles on human skin microbiota // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2023. – Vol. 188. – P. 66–77. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2023.05.004>.
6. Schneider G., Vieira L.G., de Carvalho H.E.F. та ін. Textiles impregnated with antimicrobial substances in healthcare services: systematic review // *Frontiers in Public Health*. – 2023. – Vol. 11. – Article ID: 1130829. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1130829>.
7. Puyol McKenna P., Naughton P.J., Dooley J.S.G. та ін. Microbial biosurfactants: antimicrobial activity and potential biomedical and therapeutic exploits // *Pharmaceutics*. – 2024. – Vol. 17, № 1. – Article ID: 138. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17010138>.
8. Markam S.S., Raj A., Kumar A., Khan M.L. Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste // *Current Research in Microbial Sciences*. – 2024. – Vol. 7. – Article ID: 100266. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100266>.
9. Adu S., Naughton P., Marchant R., Banat I.M. Microbial biosurfactants in cosmetic and personal skincare pharmaceutical formulations // *Pharmaceutics*. – 2020. – Vol. 12, № 11. – Article ID: 1099. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12111099>.
10. Antonoli Junior R., Poloni J.F., Pinto É.S.M., Dorn M. Interdisciplinary overview of lipopeptide and protein-containing biosurfactants // *Genes*. – 2023. – Vol. 14, № 1. – Article ID: 76. – DOI: <https://doi.org/10.3390/genes14010076>.
11. Ambaye T.G., Vaccari M., Prasad S., Rtimi S. Preparation, characterization and application of biosurfactant in various industries: a critical review on progress, challenges and perspectives // *Environmental Technology & Innovation*. – 2021. – Vol. 24. – Article ID: 102090. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102090>.
12. Granados A., Pleixats R., Vallribera A. Recent advances on antimicrobial and anti-inflammatory cotton fabrics containing nanostructures // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, № 10. – Article ID: 3008. – DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26103008>.
13. Ahmed H.B., El-Hawary N.S., Mashaly H.M., Emam H.E. End-to-end surface manipulation of dyed silk for perfection of coloration, UV-resistance and biocidal performance // *Journal of Molecular Structure*. – 2024. – Vol. 1305. – Article ID: 137766. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137766>.
14. Islam S.U., Majumdar A., Butola B.S. *Advances in Healthcare and Protective Textiles*. – Amsterdam : Elsevier, 2023.
15. Wang P., Zhang M., Qu J. та ін. Antibacterial cotton fabric prepared by a “grafting to” strategy using a QAC copolymer // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 29. – P. 3569–3581. – DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-978535/v1>.
16. Gayathiri E., Prakash P., Karmegam N. та ін. Biosurfactants: potential and eco-friendly material for sustainable agriculture and environmental safety – a review // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12. – Article ID: 662. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030662>.
17. Martyrosian I. A., Pakholiuk O. V., Nikolaychuk L. G. Investigation of mechanical properties of cotton-polyester fabrics with biocidal treatment. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2021 – № 5. – P. 209–212. – DOI: 10.31891/2307-5732-2021-301-5-209-212.
18. Ishchenko, O., Sumska, O., Smikalo, K., Feschuk, Y. and Kuchynska, D. 2023. Antimicrobial treatment of textile materials. Technical Sciences and Technologies . 4 (34) (December 2023) – P.115–128. DOI:[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-115-128](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-115-128).
19. Tkachuk P., Pivniuk S., Nikolaichuk L. Analysis of the types of processing as a factor of the formation of the properties of textile products intended for the supply of military servants. Commodity Bulletin.: Commodity Bulletin: a collection of scientific papers. 2023. T. 16. – P. 310–320. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2023-17-26>.
20. Paraska O. Study of the influence of antimicrobial agents on the operational and hygienic properties of cellulose materials / O.Paraska, H.Kovtun, L.Hes, S.Horiashchenko // *Vlakna a textil Journal*. Vol. 29 (2). – 2022. P. 73-78. http://vat.ft.tul.cz/2022/2/VaT_2022_2_8.pdf.