

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.2.3>

Received: 03.03.2026
Revised: 26.03.2026
Accepted: 23.02.2026

Андрій БОЙЧЕНКО, Вікторія ПЛАВАН,
Олена ОХМАТ, Дем'ян БОЙЧУК
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

УДК 675.046.8

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЗАКЛЮЧНОГО ОЗДОБЛЕННЯ НАТУРАЛЬНОЇ ШКІРИ ДЛЯ НАДАННЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Мета. Системний аналіз сучасних технологій заключного оздоблення натуральної шкіри з акцентом на формуванні антибактеріальних властивостей покриттів для обґрунтування вибору функціоналізованих полімерних систем на основі водорозчинних поліуретанів, модифікованих четвертинними фосфонієвими солями.

Методика. Дослідження базується на комплексному аналізі наукових публікацій, нормативно-технічної літератури, що стосуються хімії та технології оздоблення шкіри, полімерних плівкоутворювачів і антибактеріальних агентів. Використано методи порівняльного аналізу для оцінки ефективності різних класів плівкоутворювачів і антимікробних агентів, а також системний підхід до розгляду архітектури багатошарових покриттів і механізмів їх функціоналізації.

Результати. Обґрунтовано перспективність застосування четвертинних фосфонієвих солей. Доведено ефективність нанесення на шкіру оздоблювальних покриттів на основі водних поліуретанових дисперсій із ковалентно інтегрованими четвертинними фосфонієвими солями. Механізм їх дії, шляхом адсорбції катіонного центру на мікробній поверхні з незворотною дезорганізацією мембран, гарантує стійкий антибактеріальний ефект та високу якість одержаних шкіряних матеріалів.

Наукова новизна. Науково обґрунтовано перспективність використання четвертинних фосфонієвих солей, як ковалентно зв'язаних функціональних компонентів водорозчинних поліуретанів, для проведення оздоблювальних операцій натуральної шкіри без втрати експлуатаційних властивостей.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових типів оздоблювальних покриттів для натуральної шкіри з підвищеною зносостійкістю та стабільною антибактеріальною активністю. Це особливо важливо для матеріалів, що контактують зі шкірою людини, наприклад у взутті чи медичних виробках. Визначено пріоритетні напрямки подальших досліджень, що полягають у балансуванні високої антимікробної ефективності та повному збереженні унікальних фізико-механічних і гігієнічних властивостей натуральної шкіри.

Ключові слова: натуральна шкіра; фінішне оздоблення; функціоналізовані покриття; полімерні плівкоутворювачі; антибактеріальні властивості; четвертинні фосфонієві солі.

Вступ. Шкіряна промисловість історично є технологічно складним сектором глобальної легкої промисловості та хімічної інженерії. Незважаючи на стрімку популяризацію синтетичних альтернатив та матеріалів на рослинній основі, натуральна шкіра залишається абсолютним еталоном якості, довговічності та тактильного комфорту. Макроекономічні індикатори демонструють наступний тренд: глобальний ринок натуральної шкіри має позитивну динаміку. Оцінений у 97,4 млрд доларів США станом на 2025 рік, він, як очікується, досягне 148,6 млрд доларів США до 2033 року при середньорічному темпі зростання на рівні 5,4% [1]. Проте на тлі стабільного економічного зростання шкіряна промисловість зіткнулася з безпрецедентною екологічною кризою та посиленням регуляторного тиску. Парадигма шкіряної промисловості зсувається у бік концепції сталого розвитку та еко-ефективності. Сучасна наука про матеріали має вирішити дуалістичне завдання: створити покриття, яке є абсолютно безпечним з екологічної точки зору, але при цьому наділене розширеним функціоналом, що дозволить шкірі перевершувати як свої класичні аналоги, так і новітні синтетичні замінники чи сучасні біоматеріали [2].

Незважаючи на високий рівень розвитку технологій оздоблення натуральної шкіри, сучасні вимоги до матеріалів суттєво зростають. З одного боку, покриття повинні забезпечувати високі експлуатаційні характеристики, з іншого - дедалі більшого значення набувають гігієнічні властивості, зокрема здатність матеріалу протидіяти розвитку мікроорганізмів. Традиційні підходи до надання антибактеріальних властивостей мають низку обмежень (вимивання активних компонентів, потенційна токсичність та негативний вплив на фізико-механічні й гігієнічні властивості шкіри). Крім того, більшість існуючих рішень не враховують складну багатошарову архітектуру оздоблювального покриття та специфіку взаємодії полімерної матриці з волокнами колагену. Таким чином, наукова задача полягає у визначенні ефективних механізмів дії антибактеріальних агентів у багатошарових полімерних покриттях для натуральної шкіри.

Постановка завдання. Проведення системного аналізу технологій заключного оздоблення натуральної шкіри з акцентом на формуванні антибактеріальних властивостей покриттів для обґрунтування вибору функціоналізованих полімерних систем на основі водорозчинних поліуретанів, модифікованих четвертинними фосфонієвими солями.

Результати дослідження. Архітектуру оздоблювального покриття натуральної шкіри доцільно розглядати не як окремих «верхній шар» на лицьовій поверхні, а як ієрархічну систему послідовно сформованих плівки, кожна з яких виконує власну функцію і водночас впливає на поведінку наступної [3]. У технологічному сенсі оздоблення починається не з нанесення лаку, а з підготовки напівфабрикату «краст» до нанесення покривної композиції: поверхня має бути достатньо рівною, здатною до адгезійної взаємодії та сумісною з обраним видом плівкоутворювача [4]. У класичному описі сучасного виробництва оздоблювальне покриття складається з кількох шарів з різним призначенням. Принципова схема побудови оздоблювального покриття наведена на рис. 1.

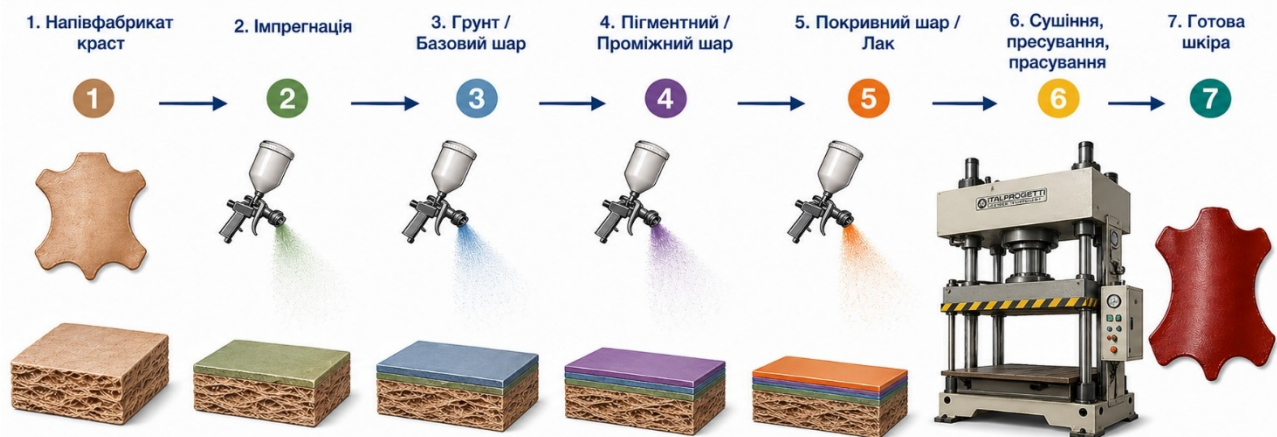


Рис. 1. Схема побудови оздоблювального покриття на поверхні шкіри

Наведена на рис. 1. схема відображає не лише послідовність нанесення, а й принцип функціонального розподілу ролей. Імпрегнація стабілізує верхній шар дерми й запобігає «провалу» наступних шарів; базовий шар вирішує проблему адгезії; пігментний шар регулює покривну здатність, вирівнювання й колір; покривний шар визначає фінальний дотик, ступінь блиску, опір тертю, воді, забрудненню та старінню [3].

Історично архітектура оздоблення формувалася разом із розвитком виробництва полімерних плівкоутворювачів. Початкові технології спиралися на природні речовини - білкові матеріали, воски, жири, смоли, пізніше казеїн. Такі системи давали шкірі виразний натуральний вигляд, характерний блиск і добру адгезію, але були чутливими до води,

мікробіологічного ураження та часто поступалися за еластичністю й стійкістю до інтенсивного тертя [4].

Наступний технологічний етап був пов'язаний із покриттями на органічних розчинниках, насамперед нітроцелюлозними лаками. Нітроцелюлоза надала верхньому шару покриття швидке висихання, виражений блиск, стійкість до сухого / мокрого тертя та дії води [5]. Нітроцелюлоза забезпечувала ефективний захист шкіри від механічних пошкоджень. Для багатьох видів шкіри, зокрема галантерейних і взуттєвих, такий тип оздоблення довго залишався еталонним. Проте суттєвим недоліком таких систем була їхня схильність до старіння та втрата пластифікаторів з часом, що призводило до розтріскування покриття. Крім того, високий вміст органічних розчинників, пожежонебезпечність та емісія легких органічних розчинників поступово зробили цю модель менш прийнятною [2].

Згодом індустрія перейшла до широкого застосування акрилатних смол (поліакрилатів), синтезованих шляхом емульсійної кополімеризації акрилової та метакрилової кислот. Акрилати стали головним «робочим інструментом» для пігментних і частково базових шарів. Їхню популярність пояснює поєднання прийнятної ціни, сумісності з пігментними пастами, світлостійкості, керованої твердості та високої технологічності [3, 6]. Водорозчинні поліакрилати добре формують плівку, мають високу стійкість до УФ-випромінювання й блокування, але за механічною та хімічною витривалістю часто поступаються поліуретанам.

Вершиною еволюції плівкоутворювачів стало широке впровадження поліуретанів (ПУ). Поліуретани утворюють сегментовані макромолекулярні структури, що складаються з жорстких ізоціанатних та м'яких поліольних блоків [4]. Ця морфологія забезпечує унікальну комбінацію високої міцності на розрив, стійкості до абразивного зношування та збереження еластичності навіть за екстремально низьких температур. Хімічна спорідненість уретанових зв'язків (-NHCOO-) із пептидними ланцюгами колагену гарантує виняткову адгезію. Поліуретани є найгнучкішим і найбільш інженерно керованим класом сучасних плівкоутворювачів для шкіри [7]. Водні ПУ-дисперсії формують стабільні системи без обов'язкового використання зовнішнього емульгатора і можуть працювати як у основних, так і у заключних шарах покриття. У архітектурі оздоблювального покриття вони особливо цінні там, де потрібні морозостійкість і висока адгезія до поверхні шкіри.

Порівняння ключових характеристик плівкоутворювачів та їх позиції в архітектурі покриття для натуральної шкіри наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння плівкоутворювачів в оздоблювальних покриттях натуральної шкіри

Властивість	Тип плівкоутворювача			
	Білкові (Казеїн)	Нітроцелюлоза	Поліакрилати	Поліуретани
Хімічне походження	Природний протеїн	Естерифікована целюлоза	Кополімери акрилової кислоти	Поліаддукти ізоціанатів і поліолів
Ключові переваги	Природний вигляд, високий склоподібний блиск, термостійкість, біорозкладність	Швидке висихання, водостійкість, високий рівень глянце	Світлостійкість, економічність, хороше зв'язування пігменту, хороше наповнення	Найвища зносостійкість, міцність на розрив, еластичність, відмінні адгезійні властивості
Критичні недоліки	Крихкість, низька водостійкість, ризик біопошкодження	Залежність від токсичних розчинників, старіння плівки,	Механічна та хімічна стійкість нижчі, ніж у ПУ; часто потребують додаткового зшивання	Висока вартість, чутливість ароматичних ПУ до ультрафіолету

Продовження табл. 1

Властивість	Тип плівкоутворювача			
	Білкові (Казеїн)	Нітроцелюлоза	Поліакрилати	Поліуретани
Типова позиція в архітектурі	Верхній шар, пігментні пасти, гібридні суміші. Глянцеві покриття	Верхні шари покриття, тверді лаки-фіксатори	Імпрегнація, ґрунтові та пігментні шари, інколи верхні шари покриття	Основні та верхні шари функціоналізованих покриттів

Аналізуючи дані з таблиці 1 можна зробити висновок про те, що функціоналізація сучасного оздоблювального покриття може відбуватися за допомогою поліуретанів, оскільки водорозчинний поліуретан дає змогу втручатися в усі рівні структури: у хімію м'якого сегмента, жорсткого сегмента, іонних центрів, подовжувачів ланцюга, динамічних зв'язків та інтерфейсів із неорганічними наночастинками. Це робить поліуретан базовою платформою для багатофункціонального дизайну покриттів [7].

Одним з напрямків функціоналізації натуральної шкіри є надання антибактеріальних властивостей покриттю, як логічна відповідь на поєднання трьох чинників: зростання вимог до гігієнічної безпеки матеріалів, поширення антибіотикорезистентних мікроорганізмів і розширення сфер застосування шкіри в умовах тривалого контакту з людиною та вологим мікросередовищем. Для шкіри це питання має особливу вагу, оскільки йдеться не лише про запобігання бактеріальній колонізації поверхні, а й про збереження зовнішнього вигляду та експлуатаційних властивостей [8].

У сучасній літературі розрізняють три принципово різні, хоча часто поєднувані, механізми антибактеріалізації поверхонь:

Система «на основі вивільнення», містить агент, який вивільняється з покриття у навколишнє середовище і пригнічує або вбиває бактерії поблизу поверхні. Такий підхід часто забезпечує швидкий ефект, але має очевидні обмеження: часову виснаженість запасу активу, ризик неконтрольованої міграції, екологічне навантаження [9].

Contact-killer покриття працюють інакше: антибактеріальний фрагмент є ковалентно зв'язаним або надійно іммобілізованим у поверхневому шарі, а інактивація клітини відбувається при безпосередньому контакті з поверхнею. Для таких матеріалів важливою є не тільки хімічна природа функціональної групи, а й поверхнева щільність заряду та її доступність для взаємодії з бактеріальною мембраною. Перевагою цього підходу є відсутність або мінімізація вимивання активу, тобто вища довговічність і кращий контроль за екологічним профілем покриття [9].

Третій механістичний рівень – *антиадгезивний*. Не завжди є безпосередньо бактерицидним, але для оздоблення шкіри він надзвичайно важливий. Оскільки біоплівка формується послідовно, навіть часткове зниження первинної адгезії бактерії або полегшення відриву її клітин може істотно зменшити ризик стійкої колонізації. У цьому контексті велике значення мають керування поверхневою енергією, гідрофільно-гідрофобним балансом, мікрорельєфом, шорсткістю та зарядом [10].

Серед методів формування антибактеріальних властивостей для натуральної шкіри найдоцільнішими виявилися саме ті, які сумісні з класичною технологією заключного оздоблення і дозволяють контролювати стабільність антибактеріального ефекту.

Використання готової композиції. Цей метод передбачає просте фізичне змішування синтезованого антибактеріального агента з дисперсією полімера перед нанесенням на шкіру. Незважаючи на легкість масштабування на промисловому обладнанні, цей підхід має критичні недоліки. З часом дрібні молекули агента можуть агрегуватися або поступово вимиватися з полімерної матриці під впливом вологи або тертя, що спричиняє стрімке зниження бактерицидної активності та порушує водостійкість самого покриття [11].

Інший метод полімеризації *In situ* – структурне «зшивання» антибактеріальної властивості у полімерну матрицю, насамперед у водорозчинний поліуретан. У таких системах катіонні ланки, зокрема четвертинні амонієві солі чи четвертинні фосфонієві солі, можуть виступати як функціональні подовжувачі ланцюга або як інтегровані фрагменти полімерної сітки. Це принципово відрізняється від простого змішування біоциду з готовою дисперсією: активна група стає частиною самої поверхневої архітектури, що зменшує ризик вимивання і водночас відкриває шлях до поєднання антибактеріальності з іншими функціями – зносостійкістю, гідрофобністю, самовідновленням або люмінесцентною індикацією дефектів [12].

Одним із найрезультативніших підходів є пошарове (*layer-by-layer*) нанесення. У шкіряних системах цей метод реалізовано, зокрема, через послідовне нанесення розчину катіонного полімеру, функціоналізованого антибактеріцидним агентом, а потім шар аніонної поліуретанової або акрилатної дисперсії. Принципова перевага полягає в тому, що такий спосіб нанесення дає можливість поєднати контактне ушкодження бактеріальної клітини, контрольоване вивільнення та антиадгезійну функцію зовнішнього шару, одночасно підвищуючи стійкість покриття до абразивного зношування та вологого тертя [13].

Для шкіряних матеріалів, що тривалий час контактують зі шкірою людини, антибактеріальний агент повинен розглядатися не ізольовано, а як функціональна частина всієї полімерної матриці. Практично важливими є щонайменше п'ять параметрів: широта антимікробної дії, спосіб реалізації ефекту на поверхні, стабільність агента в покритті, вплив на механічні й гігієнічні властивості шкіри та ризик міграції чи місцевої токсичної дії. Дослідження взаємодії антибактеріальних полімерів зі шкірою людини підкреслюють критичну необхідність перегляду підходів до конструювання матеріалів медичного, спортивного або повсякденного призначення. Шкіру людини відрізняє складна мікробіота, яка є першим ешелоним імунного захисту [14]. Саме тому, вибір конкретного антибактеріального агента вимагає ретельного балансування між його мікробіоцидною ефективністю та безпекою.

Срібло, насамперед у формі наночастинок, залишається одним із найвідоміших кандидатів до складу антибактеріальних покриттів завдяки поєднанню кількох механізмів дії: вивільненню Ag^+ , індукції оксидативного стресу бактерії та порушенню мембранних і внутрішньоклітинних процесів. Саме такі комплексні властивості пояснюють його стабільно високу ефективність у покриттях для текстилю та медичних поверхонь [15]. Проте, незважаючи на високу бактерицидність, інтеграція AgNPs у полімери супроводжується значними недоліками. До них належить висока поверхнева енергія частинок, що призводить до їхньої агломерації у матриці та вимагає застосування додаткових стабілізаторів. Важливим недоліком є також тенденція до неконтрольованого вимивання іонів Ag^+ , що зумовлює підвищену цитотоксичність і небезпеку для людини [11].

Діоксид титану та оксид цинку представляють іншу, оксидну стратегію антибактеріального захисту. Їхня привабливість полягає у відносно високій хімічній стабільності, широкому спектрі антимікробної дії та потенційній сумісності з полімерними системами. Сильною стороною ZnO та TiO_2 є здатність генерувати активні форми кисню, забезпечуючи руйнування бактеріальної мембрани [14]. Водночас існує суттєве обмеження: ефективність TiO_2 та ZnO істотно залежить від фотокаталізу: без доступу ультрафіолетового або інтенсивного видимого світла рівень генерації активної форми кисню різко знижується, що обмежує їхню ефективність у закритих просторах [14, 16, 17]. Однак, всі металеві наночастинок мають потенційну токсичність для організму людини, високу вартість виробництва та інтеграції в полімерне покриття, ризики для навколишнього середовища, можливу небажану зміну кольору поверхні [18].

Рослинні екстракти, багаті на фенольні сполуки, флавоноїди, терпеноїди, є перспективними екологічними антимікробними агентами [14]. Їхня перевага полягає у синергетичній антиоксидантній та антимікробній дії [19]. Проте критичним недоліком

фітохімічних речовин є їхня нестабільність до високих температур. В процесі полімеризації, зшивання або сушіння покриттів при високих температурах (80–120°C) може відбутись деградація.

Хітозан, як природний полісахарид, має антибактеріальну активність, зумовлену електростатичним руйнуванням клітинних мембран позитивно зарядженими аміногрупами [20]. Його головна цінність полягає в біосумісності, біорозкладності та достатньо м'якій антибактеріальній дії. Для проведення заключного оздоблення шкіри це суттєво: хітозан не лише надає функціональність, а й органічно вписується в архітектуру покриття. Однак слабкими сторонами хітозану є його розчинність і полікатионна активність виключно в кислому середовищі. Крім того, інтеграція хітозану в полімерну матрицю може блокувати дифузію до бактеріальних мембран, що призводить до різкого падіння антибактеріальної ефективності [11].

Четвертинні амонієві солі (ЧАС) мають інші переваги, зокрема здатність катіонних центрів взаємодіяти з негативно зарядженими бактеріальними мембранами, спричиняючи дезорганізацію оболонки, витік внутрішньоклітинного вмісту й загибель клітини. Ковалентне приєднання ЧАС до полімерної сітки дає шанс перейти від системи з вивільненням біоциду до довготривалої контактної дії [21]. Для ЧАС критичною є амфіфільна рівновага: подовження гідрофобного ланцюга підсилює антибактеріальні властивості, але за надмірної гідрофобності одночасно зростає цитотоксичність.

Четвертинні фосфонієві солі (ЧФС) постають як інноваційний клас катіонних антибактеріальних мономерів, що здатні подолати недоліки як неорганічних, так і біополімерних систем. Механізм дії ЧФС передбачає адсорбцію катіонного центру на негативно зарядженій поверхні бактерії з подальшою незворотною дезорганізацією мембрани із загибеллю бактерії [11]. Менша електронегативність атома фосфору порівняно з нітрогеном у ЧАС забезпечує більш ефективну взаємодію з клітинами патогенів, демонструючи високу ефективність проти мультирезистентних штамів і здатність руйнувати біоплівки. Фосфонієві аналоги часто перевершують амонієві за антибактеріальною активністю (особливо проти *Staphylococcus aureus*) та тепловою стабільністю [22]. Проте інші дослідження виявили недолік: введення ЧФС погіршувало водостійкість плівки через гідратацію катіонних груп [23].

Основні характеристики антибактеріальних агентів наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика антибактеріальних агентів

Антибакте- ріальний агент	Властивість			
	Механізм дії	Переваги / Сильні сторони	Недоліки / Слабкі сторони	Особливості інтеграції
Срібло (AgNPs)	Руйнування ферментів, ДНК та мембрани бактерії	Широкий спектр дії; висока активність при малих дозах	Цитотоксич- ність; висока вартість; неконтрольоване вимивання; зміна кольору	Схильність до агломерації; потребує стабілізаторів
Оксид цинку (ZnO)	Фотокаталітична генерація АФК	Широкий спектр дії; економічність	Потребує УФ/світла для максимальної активності	Покращує гідрофільність; стабілізується поліакрилатами
Діоксид титану (TiO ₂)	Фотокаталітична генерація АФК	Хімічна стійкість; самоочищення; біосумісність	Строга залежність від УФ-опромінення	Знижує довговічність органічних полімерів під впливом світла

Продовження табл. 2

Антибактеріальний агент	Властивість			
	Механізм дії	Переваги / Сильні сторони	Недоліки / Слабкі сторони	Особливості інтеграції
Рослинні екстракти	Багатокомпонентна фітохімічна дія на мембрану бактерії	Безпечність; екологічність; антиоксидантний ефект	Складна стандартизація; гетерогенність ефективності; вимивання	Руйнуються при сушінні/полімеризації вище 80–120°C
Хітозан (Біополімер)	Електростатичне руйнування мембрани	Екологічність; біосумісність; біорозкладність	Активність обмежена; просторові перешкоди при іммобілізації	Механічно крихкий; часто вимагає комбінування з іншими полімерами
Амонієві солі (ЧАС)	Контактне руйнування бактеріальної мембрани	Термостабільність; відсутність вимивання; висока ефективність	Гідратація іонів може підвищувати водопоглинання покриття	Ідеально підходять для ковалентного зшивання з полімером
Фосфонієві солі (ЧФС)	Контактне руйнування бактеріальної мембрани	Термостабільність; відсутність вимивання; висока ефективність	Може знижувати паропроникність; бракує розгорнутих даних для тривалого контакту з тілом	Ковалентно зв'язані системи ВПУ з оптимізованим співвідношенням гідрофобних і катіонних фрагментів

Таким чином, з урахуванням переваг і недоліків четвертинних фосфонієвих солей можна зробити висновок щодо перспективності їх використання як антибактеріального агента для надання оздоблювальному покриттю натуральної шкіри антибактеріальних властивостей, особливо за умови їх інтеграції до складу заключних оздоблювальних покриттів на основі водних поліуретанових дисперсій.

Подальші дослідження будуть направлені на розробку технологічних параметрів нанесення оздоблювального покриття з антибактеріальними властивостями на основі водних поліуретанових дисперсій на поверхню шкіри, у складі якого є ковалентно інтегровані четвертинні фосфонієві солі.

Висновки. Таким чином, з аналізу сучасних технологічних рішень у сфері заключного оздоблення натуральної шкіри для надання антибактеріальних властивостей зроблено висновок щодо перспективності використання четвертинних фосфонієвих солей як антибактеріального агента для надання оздоблювальному покриттю натуральної шкіри антибактеріальних властивостей. Механізм дії ЧФС передбачає адсорбцію катіонного центру на негативно зарядженій мікробній поверхні з подальшою незворотною дезорганізацією мембран і загибеллю бактерії. Менша електронегативність атома фосфору порівняно з нітрогеном у четвертинних амонієвих солях забезпечує більш ефективну взаємодію з клітинами патогенів, демонструючи високу ефективність проти мультирезистентних штамів. Це сприятиме формуванню стійкого антимікробного ефекту і забезпечить одержання шкіряних матеріалів високої якості.

References

1. DataIntel (n.d.). Global natural leather market report. URL: <https://dataintel.com/report/global-natural-leather-market>.
2. Sultana, R., Rashid, T. U., & Rahman, M. M. (2026). Sustainable leather processing: A critical review of emerging green technologies and practices. *Sustainable Futures*, 11, 101562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101562>.
3. Urban, D., & Takamura, K. (2002). Applications in the leather industry. In *Polymer dispersions and their industrial applications* (pp. 283–300). Wiley-VCH. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527600582.ch11>.
4. Winter, C., Schultz, M. E. R., & Gutterres, M. (2015). Evaluation of polymer resins and films formed by leather finishing. *Latin American Applied Research*, 45(4), 213–217. DOI: <https://doi.org/10.52292/j.laar.2015.400>.
5. Çivi, S., Özçelik, A., & Bayramoğlu, E. E. (2022). The effects of different lacquers used in finishing on leather color change. In *ICAMS 2022 – 9th International Conference on Advanced Materials and Systems* (pp. 297–302). DOI: <https://doi.org/10.24264/icams-2022.III.7>.
6. Cheaburu, C., & Yilmaz, O. (2020). On the preparation of polyacrylic binder via mini-emulsion polymerization for leather performance coatings. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, 21(3), 389–395. DOI: <https://doi.org/10.18038/estubtda.675206>.
7. Tian, S. (2020). Recent advances in functional polyurethane and its application in leather manufacture: A review. *Polymers*, 12(9), 1996. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12091996>.
8. Cloutier, M., Mantovani, D., & Rosei, F. (2015). Antibacterial coatings: Challenges, perspectives, and opportunities. *Trends in Biotechnology*, 33(11), 637–652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.09.002>.
9. Kaur, R., & Liu, S. (2016). Antibacterial surface design – Contact kill. *Progress in Surface Science*, 91(3), 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2016.09.001>.
10. Yang, K., Shi, J., Wang, L., et al. (2021). Bacterial anti-adhesion surface design: Surface patterning, roughness and wettability: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 99, 82–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.028>.
11. Wu, X., Wu, J., Mu, C., Wang, C., & Lin, W. (2021). Advances in antimicrobial polymer coatings in the leather industry: A comprehensive review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,

Література

1. Global Natural Leather Market Report. *DataIntel*. URL: <https://dataintel.com/report/global-natural-leather-market>.
2. Sultana R., Rashid T. U., Rahman M. M. Sustainable leather processing: a critical review of emerging green technologies and practices. *Sustainable Futures*. 2026. Vol. 11. Art. 101562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101562>.
3. Urban D., Takamura K. Applications in the leather industry. *Polymer Dispersions and Their Industrial Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. P. 283–300. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527600582.ch11>.
4. Winter C., Schultz M. E. R., Gutterres M. Evaluation of polymer resins and films formed by leather finishing. *Latin American Applied Research*. 2015. Vol. 45, No. 4. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.52292/j.laar.2015.400>.
5. Çivi S., Özçelik A., Bayramoğlu E. E. The effects of different lacquers used in finishing on leather color change. *ICAMS 2022 – 9th International Conference on Advanced Materials and Systems*. Bucharest, 2022. P. 297–302. DOI: <https://doi.org/10.24264/icams-2022.III.7>.
6. Cheaburu C., Yilmaz O. On the preparation of polyacrylic binder via mini-emulsion polymerization for leather performance coatings. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 21, No. 3. P. 389–395. DOI: <https://doi.org/10.18038/estubtda.675206>.
7. Tian S. Recent advances in functional polyurethane and its application in leather manufacture: a review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 9. Art. 1996. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12091996>.
8. Cloutier M., Mantovani D., Rosei F. Antibacterial coatings: challenges, perspectives, and opportunities. *Trends in Biotechnology*. 2015. Vol. 33, No. 11. P. 637–652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.09.002>.
9. Kaur R., Liu S. Antibacterial surface design – contact kill. *Progress in Surface Science*. 2016. Vol. 91, No. 3. P. 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2016.09.001>.
10. Yang K., Shi J., Wang L. et al. Bacterial anti-adhesion surface design: surface patterning, roughness and wettability: a review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 99. P. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.028>.
11. Wu X., Wu J., Mu C., Wang C., Lin W. Advances in antimicrobial polymer coatings in the leather industry: a comprehensive review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

- 60(42), 15004–15018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02600>.
12. He, W., Zhang, Y., Luo, F., Li, J., Wang, K., Tan, H., & Fu, Q. (2015). A novel non-releasing antibacterial poly(styrene-acrylate)/waterborne polyurethane composite containing gemini quaternary ammonium salt. *RSC Advances*, 5, 89763–89771. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA16714K>.
13. Xiang, J., Ma, L., Su, H. et al. (2018). Layer-by-layer assembly of antibacterial composite coating for leather with cross-link enhanced durability against laundry and abrasion. *Applied Surface Science*, 458, 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.165>.
14. Bryaskova, R., Philipova, N., Bakov, V., & Georgiev, N. (2025). Innovative antibacterial polymer coatings. *Applied Sciences*, 15(4), 1780. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041780>.
15. Dube, E., & Okuthe, G. E. (2025). Silver nanoparticle-based antimicrobial coatings: Sustainable strategies for microbial contamination control. *Microbiology Research*, 16(6), 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/microbiolres16060110>.
16. Younis, A. B., Haddad, Y., Kosaristanova, L., & Smerkova, K. (2023). Titanium dioxide nanoparticles: Recent progress in antimicrobial applications. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 15(3), e1860. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1860>.
17. Gaidau, C., Ignat, M., Iordache, O., Popescu, L. M., Piticescu, R. M., Ditus, L. M., & Ionescu, M. (2018). ZnO nanoparticles for antimicrobial treatment of leather surface. *Revista de Chimie*, 69(4), 767–771.
18. Nehorui, V., & Paraska, O. (2025). Porivnialnyi analiz efektyvnosti zastosuvannya suchasnykh antimikrobnnykh ahentiv dlia obrobky tekstylnykh vyrobiv viiskovo-tsyvilnoho pryznachennia [Comparative analysis of the effectiveness of modern antimicrobial agents for the treatment of military-civilian textile products]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 357(5.1), 337–345. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-43> [in Ukrainian].
19. Merino-Ramirez, P. J., & Salvador-Reyes, R. (2026). Plant extracts as antibacterial and antifungal agents in medical textiles: A systematic review of key components, efficacy, and application techniques. *Resources*, 15(4), 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources15040052>.
20. Fernandes, I. P., Amaral, J. S., Pinto, V., Ferreira, M. J., & Barreiro, M. F. (2013). Development of chitosan-based antimicrobial leather coatings. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 1229–1235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.030>.
- No. 42. P. 15004–15018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02600>.
12. He W., Zhang Y., Luo F., Li J., Wang K., Tan H., Fu Q. A novel non-releasing antibacterial poly(styrene-acrylate)/waterborne polyurethane composite containing gemini quaternary ammonium salt. *RSC Advances*. 2015. Vol. 5. P. 89763–89771. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA16714K>.
13. Xiang J., Ma L., Su H. et al. Layer-by-layer assembly of antibacterial composite coating for leather with cross-link enhanced durability against laundry and abrasion. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 458. P. 978–987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.165>.
14. Bryaskova R., Philipova N., Bakov V., Georgiev N. Innovative antibacterial polymer coatings. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 4. Art. 1780. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041780>.
15. Dube E., Okuthe G. E. Silver nanoparticle-based antimicrobial coatings: sustainable strategies for microbial contamination control. *Microbiology Research*. 2025. Vol. 16, No. 6. Art. 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/microbiolres16060110>.
16. Younis A. B., Haddad Y., Kosaristanova L., Smerkova K. Titanium dioxide nanoparticles: recent progress in antimicrobial applications. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2023. Vol. 15, No. 3. Art. e1860. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1860>.
17. Gaidau C., Ignat M., Iordache O., Popescu L. M., Piticescu R. M., Ditus L. M., Ionescu M. ZnO nanoparticles for antimicrobial treatment of leather surface. *Revista de Chimie*. 2018. Vol. 69, No. 4. P. 767–771.
18. Негоруй В., Параска О. Порівняльний аналіз ефективності застосування сучасних антимікробних агентів для обробки текстильних виробів військово-цивільного призначення. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том. 357, № 5.1. С. 337–345. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-43>.
19. Merino-Ramirez P. J., Salvador-Reyes R. Plant extracts as antibacterial and antifungal agents in medical textiles: a systematic review of key components, efficacy, and application techniques. *Resources*. 2026. Vol. 15, No. 4. Art. 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources15040052>.
20. Fernandes I. P., Amaral J. S., Pinto V., Ferreira M. J., Barreiro M. F. Development of chitosan-based antimicrobial leather coatings. *Carbohydrate Polymers*. 2013. Vol. 98, No. 1. P. 1229–1235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.030>.

21. Lainiotti, G. C., & Druvari, D. (2024). Designing antibacterial-based quaternary ammonium coatings (surfaces) or films for biomedical applications: Recent advances. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12264. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252212264>.
22. Nunes, B., Cagide, F., Fernandes, C., Borges, A., Borges, F., & Simões, M. (2024). Efficacy of novel quaternary ammonium and phosphonium salts differing in cation type and alkyl chain length against antibiotic-resistant *Staphylococcus aureus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(1), 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25010504>.
23. Wang, C., Wu, J., Li, L., Mu, C., & Lin, W. (2020). A facile preparation of a novel non-leaching antimicrobial waterborne polyurethane leather coating functionalized by quaternary phosphonium salt. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2, 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0014-8>.
21. Lainiotti G. C., Druvari D. Designing antibacterial-based quaternary ammonium coatings (surfaces) or films for biomedical applications: recent advances. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, No. 22. Art. 12264. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252212264>.
22. Nunes B., Cagide F., Fernandes C., Borges A., Borges F., Simões M. Efficacy of novel quaternary ammonium and phosphonium salts differing in cation type and alkyl chain length against antibiotic-resistant *Staphylococcus aureus*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, No. 1. Art. 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25010504>.
23. Wang C., Wu J., Li L., Mu C., Lin W. A facile preparation of a novel non-leaching antimicrobial waterborne polyurethane leather coating functionalized by quaternary phosphonium salt. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2020. Vol. 2. Art. 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0014-8>.

BOICHENKO ANDRII

PhD student,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-3269-3255>
Researcher ID: LFM-4282-2024
E-mail: boichenko.a@knuud.edu.ua

OKHMAT OLENA

PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Biotechnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>
Scopus Author ID: 57194089217
E-mail: oxmat.oa@knuud.edu.ua

PLAVAN VIKTORIIA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department of Chemical
Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>
Scopus Author ID: 6603130130
Researcher ID: I-5852-2015
E-mail: plavan.vp@knuud.edu.ua

BOICHUK DEMIAN

Master student,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: ktpthv@knuud.edu.ua

Andrii BOICHENKO, Viktoriia PLAVAN, Olena OKHMAT, Demian BOICHUK

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF FINISHING NATURAL LEATHER TO PROVIDE ANTIBACTERIAL PROPERTIES

Purpose. The purpose of this research is to conduct a systematic analysis of modern technologies used in the finishing of natural leather, with particular emphasis on the formation of antibacterial properties in coating systems. The analysis is aimed at substantiating the selection of functionalized polymer systems based on waterborne polyurethanes modified with quaternary phosphonium salts.

Methodology. The research is based on a comprehensive analysis of scientific publications and regulatory and technical literature related to the chemistry and technology of leather finishing, polymer film-forming materials, and antibacterial agents. Comparative analysis methods were used to evaluate the effectiveness of different classes of film-forming polymers and antimicrobial compounds. In addition, a systematic approach was applied to examine the architecture of multilayer coating systems and the mechanisms by which such coatings can be functionalized to provide long-term antibacterial activity.

Findings. The feasibility of using quaternary phosphonium salts has been substantiated. The effectiveness of applying finishing coatings based on aqueous polyurethane dispersions containing covalently integrated quaternary phosphonium salts onto leather has been demonstrated. Their mechanism of action, involving adsorption of the cationic centre onto the microbial surface followed by irreversible membrane disorganization, ensures a durable antibacterial effect and the high quality of the resulting leather materials.

Originality. The perspective of utilizing quaternary phosphonium salts as covalently bonded functional components in waterborne polyurethanes is scientifically substantiated, specifically for natural leather finishing operations without compromising the leather's performance properties.

Practical value. The obtained results may be used as a theoretical and technological basis for the development of new types of finishing coatings for natural leather with enhanced wear resistance and stable antibacterial activity. This is especially important for leather materials intended for direct contact with human skin, for example in footwear, lining materials, insoles, orthopaedic products, and medical applications. Priority directions for further research are identified, focusing on balancing high antimicrobial efficacy while fully preserving the unique physical-mechanical and hygienic properties of natural leather.

Keywords: natural leather; leather finishing; functionalized coatings; polymer film-forming materials; antibacterial properties; quaternary phosphonium salts.