

Ельвіра ШЕМЕНА, студент,

Лілія ДРОНЬКО, асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна,  
e-mail: dronko-fbmi@iit.kpi.ua

## ВИКОРИСТАННЯ БАКТЕРІАЛЬНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ В ЯКОСТІ ГІДРОГЕЛЕВОЇ ПОВ'ЯЗКИ ДЛЯ ЗАГОЄННЯ ТЕРМІЧНИХ ОПІКОВИХ РАН

**Анотація.** Бактеріальна целюлоза (БЦ) – це полісахарид, який виробляється деякими бактеріями, зокрема *Gluconacetobacter*, *Sarcina* та *Agrobacterium*, шляхом окислювальної ферментації. Цей біополімер складається з ланцюгів глюкози, які утворюють мікрофібрили, які потім об'єднуються в целюлозні волокна та утворюють каркаси. БЦ має такі переваги, як хороша біосумісність, висока пористість, хороша повітропроникність, вологопоглинання, утримання води, чудові механічні властивості та гнучкість [1]. У цьому огляді ми проаналізували останні досягнення у використанні БЦ в якості гідрогелевої пов'язки, їх властивості та обмеження, а також потенційне застосування для загоєння ран від термічних опіків.

**Ключові слова:** гідрогелева пов'язка, бактеріальна целюлоза, опік, загоєння, регенерація.

### Актуальність дослідження

Своєчасне та ефективне лікування термічних опіків шкіри має вирішальне значення для запобігання інфекції, сприяння правильному загоєнню ран, мінімізації утворення рубців та зменшення довгострокових ускладнень, таких як контрактури. Традиційні методи надання першої допомоги при опіках передбачають використання гідрогелевих пов'язок, метою яких є забезпечення вологого середовища для загоєння рани. Однак в останні роки зростає інтерес до використання БЦ в якості гідрогелевої пов'язки для регенерації ран завдяки її унікальним біологічним властивостям та потенційною перевагою над синтетичними гідрогелевими пов'язками [2].

### Мета дослідження

Вивчення властивостей БЦ та її потенціалу для застосування у медичній галузі. Буде проведено порівняльний аналіз характеристик бактеріальної целюлози з синтетичними гідрогелями для визначення їх переваг та недоліків.

### Основні матеріали досліджень

БЦ може вироблятися на різних субстратах і може бути вирошена в практично будь-яку форму завдяки своїй високій здатності до формування під час синтезу. Вона має сильно набряклу мережу волокон, що призводить до унікальної текстури, відмінної від типових гелів. Крім того, БЦ має більш кристалічну структуру порівняно з рослинною целюлозою, що сприяє її винятковим механічним властивостям, модуль Юнга якої сягає 15 ГПа [3].

Порівняно з іншим видом натуральної целюлози наприклад рослинної, БЦ є більш хімічно чистою, оскільки не містить геміцелюлози або лігніну. Вона має вищу водоутримуючу здатність, гідрофільність і міцність на розрив завдяки підвищеній полімеризації. Крім того, БЦ утворює надтонку мережеву архітектуру з характерними стрічкоподібними мікрофібрилами, які набагато менші, ніж у рослинної целюлози, що призводить до більш пористої структури. Їх розмір зображено на рис. 1.

Відомо, що БЦ виробляють роди *Komagataeibacter*, *Acetobacter*, *Sarcina ventriculi* та *Agrobacterium*. Серед цих родів найбільш ефективними продуцентами целюлози є *Acetobacter xylinum*, *Acetobacter hansenii* та *Acetobacter pasteurianus*. *Acetobacter xylinum*, зокрема, вважається модельним організмом для дослідження целюлози завдяки своїй здатності виробляти відносно високі рівні полімеру з широкого спектру джерел вуглецю та азоту.

Процес ферментації для виробництва БЦ можна проводити в статичному або перемішуваному режимах, в результаті чого утворюються різні форми целюлози.

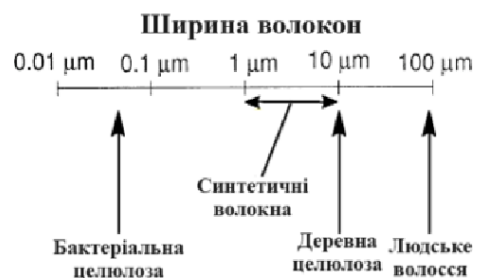
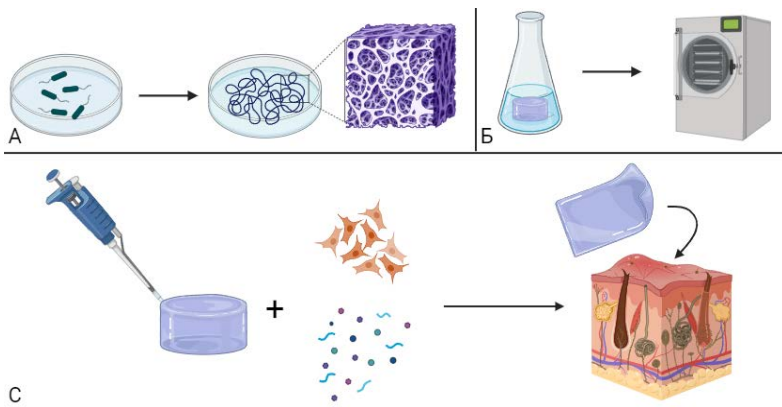


Рис. 1. Розміри синтетичних і природних волокон [4]



**Рис. 2.** Загальний принцип створення гідрогелевих пов'язок на основі БЦ. (А) Культивування бактеріальних культур які є продуцентами целюлози, у відповідному середовищі. (Б) Очищення (промивання) БЦ та ліофільне сушіння. (С) Функціоналізація БЦ та створення сприятливого середовища для подальшої інтеграції фармакологічних або біологічних агентів (напр. стовбурові клітини/фібробласти), які будуть сприяти загоєнню рани або адресній доставці ліків

За статичних умов утворюються тривимірні взаємопов'язані сітчасті пелікули, тоді як умови перемішування призводять до утворення гострих, нерегулярних сфероподібних частинок целюлози. Для досягнення максимальної продуктивності культивування БЦ у промислових масштабах, напівперервні процеси мають більше переваг в порівнянні з безперервними.

Ферментаційне середовище інкубують протягом 1...14 днів при рН 4...7 і температурі 28...30 °С, з належною аерацією і утворенням CO<sub>2</sub> для контролю метаболічної активності для виробництва БЦ. Хоча культивування з перемішуванням є більш дорогим через постійне перемішування, воно, як правило, збільшує вихід продукції порівняно зі

статичним культивуванням. При перемішуванні БЦ виробляється у вигляді твердих кульок. Збільшення швидкості зсуву може підвищити біопродуктивність, але надмірний зсув може призвести до утворення турбулентних сил, що потенційно може призвести до того, що штами, які продукують БЦ, стануть целлюлозно-негативними [3, 5]. На рис. 2. зображена загальні етапи створення та промивання БЦ для її подальшого використання для загоєння опікових ран.

### Результати

БЦ має такі переваги, як висока чистота, виняткова механічна міцність, біосумісність, здатність до формування та пористість, що робить її привабливою для різних застосувань. Однак процес її виробництва може бути відносно дорогим порівняно з синтезованими гідрогелями, які з іншого боку, пропонують більшу універсальність з точки зору складу матеріалу і потенційну економію коштів, але можуть погіршити механічні властивості і здатність до пластичності.

**Таблиця 1**

### Порівняння властивостей БЦ та синтезованого гідрогелю

Властивості	Бактеріальна целюлоза	Гідрогель хімічно-синтезований
Джерело	Виробляється бактеріями (напр. <i>Acetobacter</i> , <i>Gluconacetobacter</i> )	Хімічно синтезована
Структура	Висококристалічні, стрічкоподібні мікрофібрили	Аморфна або напівкристалічна мережа
Чистота	Висока чистота, не містить лігніну та геміцелюлози (+)	Може містити домішки синтезу (+/-)
Водопоглинання	Дуже висока здатність до водопоглинання (+)	Від помірного до високого водопоглинання (+/-)
Механічна міцність	Надзвичайно висока міцність на розрив (+)	Помірна або низька механічна міцність (-)
Біосумісність	Висока біосумісність і здатність до біологічного розкладання (+)	Біосумісність залежить від використовуваних матеріалів (+/-)
Наявність зшивачів	Відсутні, зшивається самоскладанням волокон (+)	Зазвичай містять хімічні зшивачі, які можуть бути токсичними для рани (-)
Пластичність	Висока здатність до формування у різні форми (+)	Обмежена здатність до формування, залежить від методу синтезу (-)
Пористість	Надтонка, високопориста структура (+)	Пористість можна контролювати під час синтезу (+/-)
Вартість	Відносно дорогий виробничий процес (-)	Потенційно нижча вартість, залежно від матеріалів (+)
Сталість	Відновлюване і стає джерело (+)	Сталість залежить від матеріалів-прекурсорів (+/-)

### **Висновки**

Доклінічні дослідження показали, що єдиним недоліком бактеріальної целюлози є відсутність власних антибактеріальних властивостей. Тому в майбутньому необхідно зосередитися на розробці методів її модифікації з додаванням антибактеріальних агентів або функціоналізації її поверхні для надання антимікробних властивостей. Це дозволить розширити сферу застосування БЦ, зокрема, в медичній галузі, де антибактеріальні властивості є критично важливими.

Проблематика ціни на пов'язки з БЦ залишається одним з основних бар'єрів для її широкомасштабного комерційного використання. Хоча БЦ має унікальні властивості, які перевершують синтетичні гідрогелі, її висока вартість може обмежувати застосування у певних галузях. Тому необхідно продовжувати дослідження та розробки для оптимізації технологічного процесу та зниження витрат на виробництво бактеріальної целюлози.

### **Література**

1. Su, J., Li, J., Liang, J., Zhang, K., & Li, J. (2021). Hydrogel preparation methods and biomaterials for wound dressing. *Life*, 11(10), 1016. <https://doi.org/10.3390/life11101016>.
2. Narayanan KB, Bhaskar R, Sudhakar K, Nam DH, Han SS. Polydopamine-Functionalized Bacterial Cellulose as Hydrogel Scaffolds for Skin Tissue Engineering. *Gels*. 2023 Aug 14;9(8):656. doi: 10.3390/gels9080656. PMID: 37623111; PMCID: PMC10454226.
3. Lahiri D, Nag M, Dutta B, et al. Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent. *Int J Mol Sci*. 2021;22(23):12984. Published 2021 Nov 30. doi:10.3390/ijms222312984
4. Fumihiro Yoshinaga, Naoto Tonouchi, Kunihiro Watanabe, Research Progress in Production of Bacterial Cellulose by Aeration and Agitation Culture and Its Application as a New Industrial Material, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, Volume 61, Issue 2, 1 January 1997, Pages 219–224, <https://doi.org/10.1271/bbb.61.219>.