

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.4.3>

Received: 11.07.2026
Revised: 21.08.2026
Accepted: 30.09.2026
Published: 05.10.2026

Ірина ЛЯШОК, Андрій СІКОРА

Київський національний університет технологій та дизайну,
Україна

УДК 541.64:
539.2:537.5

ЕЛЕКТРОФОРМОВАНІ УЛЬТРАТОНКІ ВОЛОКНИСТІ МАТЕРІАЛИ З РОСЛИННИМИ ЕКСТРАКТАМИ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МЕДИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Мета. Визначення основних технологічних підходів до одержання методом електроформування ультратонких волокнистих матеріалів із біологічно активними компонентами рослинного походження та оцінка перспектив їх застосування як функціональних матеріалів медичного призначення.

Методика. Проведено аналіз сучасних наукових публікацій щодо одержання електроформованих УВМ із компонентами рослинного походження. Розглянуто способи підготовки та екстракції рослинної сировини, типи полімерних матриць, технологічні параметри й способи електроформування, а також методи оцінки біологічних властивостей одержаних матеріалів.

Результати. Встановлено, що для одержання рослинних екстрактів найчастіше використовують воду, етанол і метанол, при цьому вибір екстрагента визначає склад вилучених біологічно активних речовин; серед проаналізованих полімерних матриць найчастіше застосовують ПВС; введення рослинних компонентів дає змогу одержувати УВМ з антибактеріальною, протигрибковою та антиоксидантною активністю. Розглянуто можливість використання капілярного, безголкового та коаксіального способів електроформування.

Наукова новизна. Запропоновано комплексний підхід до систематизації технологічних рішень щодо одержання електроформованих УВМ із компонентами рослинного походження.

Практична значимість. Представлені результати можуть бути використані при плануванні експериментальних досліджень, зокрема при виборі рослинної сировини, способу її екстракції, полімерної матриці та технологічного підходу до одержання електроформованих матеріалів медичного призначення. Визначені технологічні особливості можуть бути враховані при розробленні функціональних волокнистих матеріалів із компонентами лікарських рослин, зокрема перспективних ранових покриттів.

Ключові слова. електроформування; рослинні екстракти; біологічна активність; ранові покриття; полімерні матриці; екстракція.

Вступ. Щоденна побутова та професійна діяльність людини часто супроводжується дрібними ушкодженнями шкірного покриву, такими як садна, поверхневі порізи, пошкодження епітелію, забої тощо. Опосередковано значну потребу у засобах для лікування ран підтверджують і дані щодо розвитку світового ринку засобів для догляду за ранами та ранових покриттів [1, 2]. Зокрема, обсяг світового ринку ранових покриттів у 2023 році оцінювався у 14,2 млрд дол. США та, за прогнозами, до 2030 року може зрости до 18,9 млрд дол. США із середньорічним темпом зростання 4,1% [2].

Найчастіше як ранові покриття застосовують адгезивні пов'язки (пластирі), що, попри свою доступність, мають низку технологічних недоліків. Одним із них є низька газопроникність, що може призводити до мацерації тканин під пов'язкою або, навпаки, надто швидкого висихання ушкодження [3]. У цьому контексті підвищений інтерес викликають ультратонкі волокнисті матеріали (УВМ), одержані методом електроформування (ЕФ), що меншою мірою піддані впливу подібного недоліку. Завдяки високій пористості та питомій площі поверхні такі пов'язки можуть забезпечити для рани значно ефективніший газообмін та водночас запобігти перезволоженню тканин [4, 5].

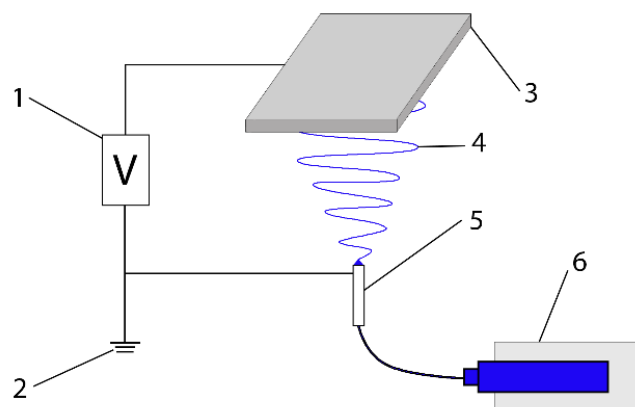
Аналіз сучасних досліджень свідчить про зростаючий інтерес авторів до інтеграції біологічно активних компонентів у склад формувальних розчинів. Зокрема значна частина

робіт стосується вивчення можливості внесення екстрактів лікарських рослин та властивостей одержаних матеріалів. Лікарські рослини є важливим джерелом біологічно активних речовин, зокрема алкалоїдів, флавоноїдів, терпеноїдів, поліфенолів та інших сполук, що мають доведену біологічну активність. Властивості одержаних УВМ із рослинними компонентами залежать від виду рослинної сировини, використаної полімерної матриці, технологічних параметрів та способу екстракції, вибір якого у значній частині робіт не має достатнього обґрунтування.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення основних технологічних підходів до одержання методом електроформування ультратонких волокнистих матеріалів із біологічно активними компонентами рослинного походження. Основну увагу приділено способам підготовки та екстракції рослинної сировини, вибору полімерних матриць, технологічним параметрам і способам електроформування, а також оцінці біологічних властивостей одержаних матеріалів, з огляду на перспективи їх застосування як функціональних ранових покриттів.

Результати дослідження. Метод електроформування (ЕФ), що ґрунтується на принципах електростатичних сил, є відомим способом одержання нетканих ультратонких волокнистих матеріалів (УВМ) з високою питомою поверхнею. Діаметр волокон у таких матеріалах може сягати нанорозмірного рівня, а гнучкість параметрів процесу дає змогу одержувати УВМ із заданими властивостями [6].

Процес ЕФ здійснюється у високовольтному електричному полі. Один із полюсів високовольтного джерела живлення підключають до капіляра, через який подається полімерний розчин або розплав. Такий капіляр називають формувальним електродом (ФЕ). Інший полюс підключають до сітки, пластини або вала, розташованих на певній відстані від капіляра; ці елементи виконують функцію осаджувального електрода (ОЕ). У процесі формування полімерний розчин або розплав набуває електричного заряду. Під дією електростатичних сил на кінці капіляра формується характерний конус Тейлора, з вершини якого за досягнення критичного значення напруженості електричного поля викидається тонкий заряджений струмінь полімеру [7]. У подальшому струмінь зазнає інтенсивного витягування та нестабільностей, що супроводжуються випаровуванням розчинника і формуванням ультратонких волокон. Одержані волокна осаджуються на поверхні ОЕ та утворюють неткану волокнисту матрицю. Схематичне зображення лабораторної установки для електроформування наведено на рис. 1.



Джерело: [8].

Рис. 1. Схематичне зображення лабораторної установки для електроформування:
1) – джерело постійного струму; 2) – перетворювач напруги; 3) – осаджувальний електрод; 4) – дрейфуючі волокна; 5) – капіляр; 6) – інфузомат

Формування конуса Тейлора та подальша стабільність полімерного струменя значною мірою залежать від властивостей розчину (в'язкість, електропровідність, поверхневий натяг), технологічних параметрів процесу (напруга електричного поля, відстань між електродами, швидкість подачі, діаметр капіляра, тип ОЕ), а також від параметрів середовища (температура, вологість). Так, зазвичай збільшення швидкості подачі матеріалу або діаметра капіляра призводить до збільшення діаметра одержуваних волокон, тоді як збільшення напруги електричного поля чи відстані між електродами – до зменшення. Підбір вищезгаданих параметрів визначає морфологію, середній діаметр та однорідність одержуваних волокон [6].

Важливою особливістю методу, що привертає увагу дослідників, є можливість інтегрування у полімерні розчини екстрактів лікарських рослин, препаратів, наночастинок та інших біоактивних добавок. Волокнисті мати, одержані з таких розчинів, мають перспективи застосування як функціональні ранові пов'язки, здатні поєднувати захисну функцію з біологічною активністю введених компонентів.

Лікарські рослини широко застосовуються як у традиційній медицині, так і у сучасній фармацевтичній промисловості. Водночас промислове застосування рослинної сировини ускладнене, зокрема варіабельністю складу, що залежить від сорту, умов вирощування, кліматичного впливу та інших чинників, що ускладнюють відтворюваність складу та виготовлення стандартизованих лікарських форм. Додатково суттєвим обмеженням є нестабільність біологічно активних сполук у процесі технологічної обробки та зберігання, що може призводити до зниження їх активності. У цьому контексті застосування методу ЕФ розглядається також як спосіб подолання зазначених обмежень шляхом іммобілізації рослинних екстрактів у полімерних електроформованих волокнах, що потенційно може забезпечувати їх інкапсуляцію, захист від впливу зовнішніх чинників та контрольоване вивільнення [9, 10].

У проаналізованих роботах найпоширенішим підходом є одержання рослинних екстрактів із подальшим їх внесенням до полімерного розчину перед процесом ЕФ. Узагальнену схему одержання УВМ, що містять екстракти лікарських рослин, наведено на рис. 2.

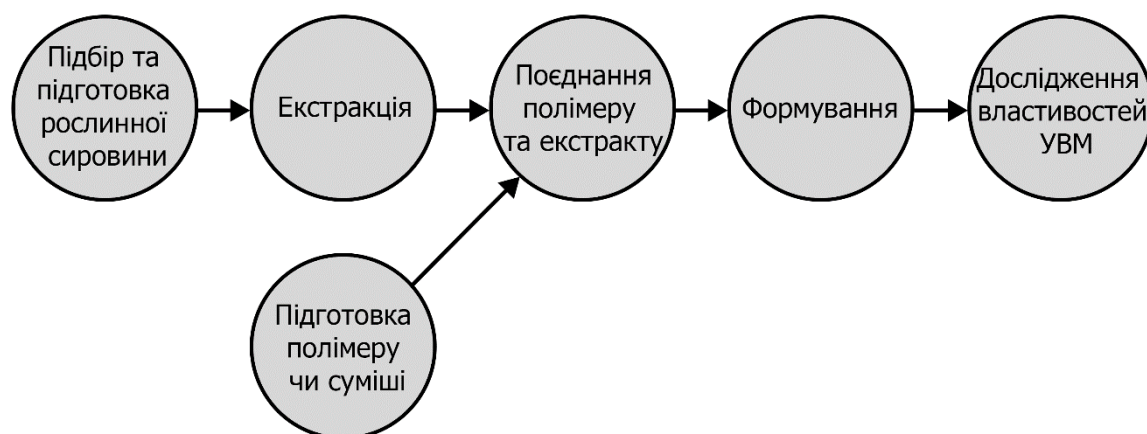


Рис. 2. Загальна схема одержання УВМ методом ЕФ, з використанням рослинної сировини

Підбір лікарських рослин здійснюють з урахуванням вмісту біологічно активних речовин, що здатні впливати на біологічні процеси організму. Їх підготовка в розглянутих роботах зазвичай передбачає промивку, сушку та подрібнення частин рослин до необхідної фракції для подальшої екстракції. Найчастіше для одержання екстрактів використовували дистильовану воду [11, 12], етанол [13–17] та метанол [9, 10, 18–20]. Водночас у більшості проаналізованих робіт вибір екстрагента не супроводжується належною аргументацією або порівнянням його ефективності з альтернативними методами екстракції.

Винятком із підходу, що передбачає попереднє одержання рослинного екстракту, є дослідження алое-нановолокнистих мембран для лікування діабетичних ран, що були виготовлені з використанням ручного апарату для ЕФ [21]. У дослідженні фактично відсутня стадія екстракції, натомість розчин полівінілового спирту (ПВС) готувався безпосередньо на основі очищеного, відфільтрованого та центрифугованого гелю алое, а одержані зразки значно сприяли гоєнню ран завдяки антиоксидантній та протизапальній активності.

Вибір екстрагента істотно впливає на склад одержаного екстракту, оскільки полярність розчинника визначає спектр вилучених біологічно активних речовин. Показовим є дослідження екстракції *Severinia buxifolia* з використанням різних екстрагентів, результати якого продемонстрували, що використання метанолу забезпечує найвищий вихід екстракції – 33,2%, а дистильована вода та етанол – 27,0% та 12,2% відповідно [22]. У межах згаданого дослідження, використання метанолу як екстрагента забезпечує максимальну екстракцію основних груп біологічно активних речовин, тоді як вода – низький рівень екстракції флавоноїдів, алкалоїдів та терпеноїдів, а етанол – низький рівень екстракції фенольних сполук.

Попри досить поширене використання в роботах метанолу як екстрагента, більшість досліджень не обговорює можливий вплив вибору цього розчинника на перспективи подальшого медичного застосування одержаних матеріалів. Водночас відповідно до настанови ІСН Q3C(R9) метанол належить до розчинників 2 класу, що потребує контролю його залишкового вмісту у продукції медичного призначення [23]. З огляду на це при розробленні матеріалів для медичного застосування вибір екстрагента доцільно здійснювати не лише з урахуванням ефективності екстракції, а й вимог біобезпеки та відповідно до чинних регуляторних вимог.

Вибір полімерної матриці є одним із ключових чинників, що визначають ефективність процесу електроформування та властивості одержаних УВМ. Підсумовуючи аналіз актуальних досліджень, слід виділити ПВС як найчастіше використовуваний полімер [11, 14, 16, 17, 19, 23–25]. Значну увагу автори також приділяють таким полімерам, як полівінілпіролідон (ПВП) [10, 12, 18], полікапролактон (ПКЛ) [9], полімолочна кислота (ПМК) [26, 27]. Окрім індивідуальних полімерів, у проаналізованих роботах застосовували також композиції, зокрема ПВП з ацетатом целюлози (АЦ) [13], ПВС із хітозаном (ХТ) [28], поліетиленоксид (ПЕО) із ХТ [29, 30] та інші комбінації.

Вибір полімеру залежить від його здатності до волокноутворення, сумісності з рослинними компонентами та вимог до властивостей кінцевого матеріалу. Використані полімери можна умовно поділити на водорозчинні синтетичні, біорозкладні гідрофобні синтетичні та природні або напівсинтетичні. До першої групи належать ПВС, ПВП і ПЕО, які добре сумісні з водними рослинними екстрактами та забезпечують стабільне електроформування, але мають обмежену водостійкість. ПМК і ПКЛ є біорозкладними гідрофобними полімерами, що забезпечують механічну міцність і тривалу стабільність матеріалів. ХТ та АЦ поєднують природне походження або спорідненість із природними полімерами з біосумісністю та функціональними властивостями, хоча ХТ часто потребує введення допоміжного волокноутворювального полімеру.

Типово процес електроформування здійснюється з використанням установки капілярного типу, схематичне зображення якої наведено вище на рис. 1. У проаналізованих роботах напруга джерела електричного поля зазвичай становила 12–30 кВ, відстань між електродами – 10–20 см, а як капіляр використовували голки з внутрішнім діаметром близько 0,3 мм.

У цьому контексті слід звернути увагу на дослідження з інтеграції прополісу в розчині ПВС, де застосовано метод безголкового формування [25]. Установки капілярного типу мають низку технологічних обмежень, основним з яких є обмежена продуктивність капіляра.

Одним із способів підвищення продуктивності є збільшення кількості капілярів, що ускладнює конструкцію установки та значною мірою підвищує складність процесу ЕФ.

Альтернативним рішенням є застосування безголкового формування. У безголковому методі як ФЕ застосовують частково занурений у ванну з формувальним розчином циліндр, що обертається. Схематичне зображення безголкової установки наведено на рис. 3.

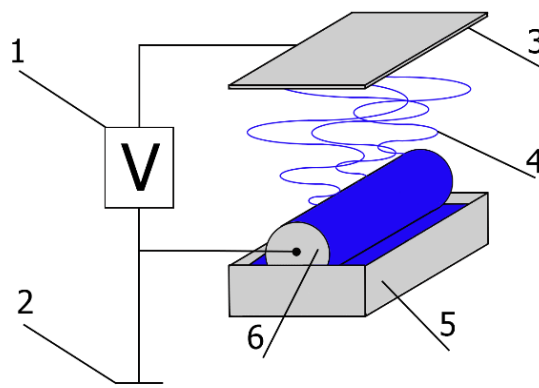


Рис. 3. Схематичне зображення безголкової установки для електроформування, побудоване за описом у [25]: 1) – джерело постійного струму; 2) – перетворювач напруги; 3) – осаджувальний електрод; 4) – дрейфуючі волокна; 5) – ванна із полімерним розчином; 6) – формувальний електрод (циліндр)

За такого способу утворення конуса Тейлора відбувається не в одній точці, а хаотично по всьому циліндру, що значною мірою збільшує вихід УВМ. У ході згаданого дослідження було одержано високоякісні волокнисті мати, що забезпечували утримання понад 73% введеного прополісу та містили до $33,13 \pm 0,41$ мг/м³ флавоноїдів.

Також варто окремо відзначити роботу з одержання нановолокнистого пластиря із асиметричною змочуваністю [31]. У роботі було здійснено коаксіальне формування за принципом голка в голці, що дало змогу одержати гідрофільну коаксіальну мембрану, ядро якої складалося з гіалуронової кислоти та ПЕО, що було оповите оболонкою з ПКЛ та ПЕО. Її доповнення гідрофобною мембраною із ПКЛ забезпечувало ефективну доставку води та чудове зволоження ран під час випробувань на шкірі мишей, ураженій псоріазом. За допомогою коаксіального формування у гідрофільний шар було введено триптантрин та індірубін, що продемонстрували контрольований профіль вивільнення та значну протипсоріатичну дію.

Для характеристики одержаних матеріалів автори найчастіше використовували такі відомі методи, як сканувальна електронна мікроскопія (SEM) та FTIR-спектроскопія. Метод SEM застосовували для оцінки морфології волокон, зокрема їх діаметра, однорідності та наявності дефектів, тоді як FTIR-спектроскопію – для ідентифікації характерних функціональних груп та оцінки взаємодій між компонентами матеріалу. В окремих роботах для дослідження морфології застосовували також оптичну мікроскопію, однак обмежена роздільна здатність цього методу не дозволяє достовірно характеризувати волокна нанометрового діапазону.

Як зазначалось вище, першопричиною внесення рослинних екстрактів до складу формувальних розчинів є вміст у них біологічно активних речовин, здатних впливати на біологічні процеси організму. З огляду на перспективи застосування таких матеріалів у медицині та стоматології дослідники насамперед оцінюють їх антибактеріальні [14, 17, 19, 30], протигрибкові [11], антиоксидантні [16, 20] та інші біологічні властивості.

Для оцінки антибактеріальних властивостей одержаних зразків дослідники зазвичай застосовують метод дифузії в агар. На поживне середовище, інокульоване культурами грампозитивних чи грамнегативних бактерій, вносять досліджуваний зразок, після чого за результатами інкубації визначають зону затримки росту (ЗЗР) бактерій.

Так, наприклад, листя бетелю (*Piper betle*), що широко застосовується у традиційній медицині Південної та Південно-Східної Азії, екстрагували та ввели до складу формувального розчину на основі ПВС [14]. Одержані волокнисті мати демонстрували антибактеріальну властивість проти бактерій *S. aureus* та *E. coli*, а їх ЗЗР сягала 20 мм.

Схожі результати ЗЗР були отримані у ході випробовування антибактеріальних властивостей зразків УВМ, одержаних із суміші ХТ та ПЕО (90:10), що містили 1–10% мас. лавсону – нафтохінону рослинного походження, що міститься в листях хни (*Lawsonia inermis*) [30]. Одержані зразки продемонстрували ЗЗР близько 30 мм проти *S. aureus* та близько 25 мм проти *E. coli*.

Для порівняння, під час дослідження комерційних антимікробних ранових покриттів Urgotul SSD, Bactigras, Acticoat, Askina Calgitrol Ag та Aquacel Ag значення ЗЗР проти *S. aureus* знаходились у межах 1,13–24,33 мм, а проти *E. coli* – 0,78–15,98 мм [32]. Таким чином, наведені результати свідчать, що УВМ із рослинними біологічно активними компонентами здатні забезпечувати антибактеріальну активність, співставну за величиною ЗЗР із комерційними антимікробними рановими покриттями. Водночас таке порівняння має орієнтовний характер, оскільки значення ЗЗР залежать від умов проведення випробувань та здатності активних компонентів дифундувати з матеріалу в поживне середовище.

Зазвичай для оцінки стійкості синтетичних полімерних матеріалів до дії цвілевих та міцеліальних грибків застосовують метод ASTM G21. Метод демонструє, чи може досліджуваний матеріал стати поживним середовищем для мікроорганізмів у вологому середовищі. Проте під час дослідження властивостей зразків УВМ, одержаних з розчинів ПВС, що містили екстракт аргемони мексиканської (*Argemone mexicana*) – рослини родини макових, метод ASTM G21 було модифіковано, що дало можливість оцінити пригнічення росту грибних колоній в агарі під дією досліджуваних зразків [11]. Автори відзначають, що здатність одержаних УВМ пригнічувати ріст грибів зростала зі збільшенням вмісту водного екстракту аргемони мексиканської, а зразки, що містили 15 мас. % екстракту, пригнічували ріст *Penicillium pinophilum* повністю.

Оцінку антиоксидантних властивостей здійснюють з використанням DPPH-тесту. Реакція DPPH·(2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил) з антиоксидантами супроводжується зміною кольору розчину з фіолетового до блідо-жовтого. Зміну оптичної густини розчину визначають методом УФ-спектрофотометрії, а антиоксидантну активність виражають як відсоток інгібування DPPH-радикалів.

Варто відзначити роботу, пов'язану з інкапсуляцією екстракту хромолени запашної (*Chromolaena odorata*) у волокна на основі 10 % мас. розчину ПВС [16]. Хромолена запашна, що здавна застосовується в народній медицині для гоєння ран, була висушена, подрібнена та екстрагована етанолом. Готовий екстракт було введено до складу формувального розчину, а одержані зразки були піддані DPPH-тесту. Антиоксидантну активність визначали через 2, 4, 6, 8 та 24 години; вона становила $7,2 \pm 4,4$, $18,1 \pm 1,8$, $30,2 \pm 1,8$, $38,6 \pm 0,9$ та $81,2 \pm 1,7\%$ відповідно.

Цікавими також є результати дослідження антиоксидантної активності зразків на основі казеїнату натрію/ПВС (100/24, мас./мас.), що містили екстракти материнки звичайної (*Origanum vulgare* L.) та розмарину (*Rosmarinus officinalis*) [20]. До складу формувальних розчинів окремо вводили 1 або 3 мас. % метанольних екстрактів материнки та розмарину, а також водного екстракту розмарину. Волокна без рослинних екстрактів демонстрували незначну антиоксидантну активність на рівні близько 1,6%, що автори пов'язували із антиоксидантними властивостями самого казеїнату натрію, тоді як введення екстрактів сприяло її суттєвому підвищенню. Найвищі значення були встановлені для зразків із 3 мас. % метанольного екстракту розмарину та материнки – близько 68 та 56% відповідно. Автори пов'язують відмінності антиоксидантної активності зразків зі складом екстрактів та

полярністю використаного екстрагента, що підкреслює важливість обґрунтованого вибору екстрагента.

Висновок. Проведений аналіз сучасних досліджень показав, що одержання методом електроформування УВМ із біологічно активними компонентами рослинного походження передбачає комплексний підхід до підготовки рослинної сировини, вибору полімерної матриці, способу електроформування та його технологічних параметрів. Екстракти, одержані з використанням різних екстрагентів, можуть бути введені до складу формувального розчину, а вибір екстрагента визначає основні групи біологічно активних речовин, що вилучаються з рослинної сировини. Введення рослинних екстрактів дозволяє одержувати УВМ з вираженою антибактеріальною, протигрибковою та антиоксидантною активністю. Вибір полімерної матриці залежить від її здатності до волокноутворення та вимог до властивостей кінцевого матеріалу. Серед розглянутих полімерів найбільш поширеним є ПВС, який є водорозчинним та має добру здатність до волокноутворення. Використання інших синтетичних, природних і напівсинтетичних полімерів та їх сумішей, зокрема з ПВС, розширює можливості регулювання властивостей УВМ, зокрема їх біосумісності, гідрофільності, гідрофобності, характеру змочування та вивільнення інкапсульованих речовин. Застосування капілярного, безголкового та коаксіального способів електроформування розширює технологічні можливості одержання УВМ, а підбір параметрів процесу дає змогу регулювати морфологію, діаметр та однорідність сформованих волокон.

Таким чином, електроформовані УВМ із компонентами рослинного походження поєднують характерну волокнисту структуру, високу питому площу поверхні та пористість із функціональними властивостями рослинних компонентів, що робить їх перспективними матеріалами для створення функціональних ранових покриттів. Узагальнені в роботі технологічні підходи можуть бути використані як основа для планування подальших експериментальних досліджень, зокрема при виборі рослинної сировини та способу її екстракції, полімерної матриці, способу й умов електроформування відповідно до необхідних властивостей та передбачуваного призначення кінцевого матеріалу.

References

Література

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Grand View Research (2023). Wound Care Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Advanced, Surgical), By Application (Acute, Chronic), By End-use, By Mode of Purchase, By Distribution Channel, By Region, And Segment Forecasts, 2023–2030. Grand View Research. 200 p.2. Grand View Research (2024). Wound Dressing Market (2024–2030): Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Traditional Dressing, Advanced Dressing), By Application (Chronic Wounds, Acute Wounds), By End-use, By Region, And Segment Forecasts. Grand View Research, Inc. 140 p.3. Liu, X., Xu, H., Zhang, M., & Yu, D.-G. (2021). Electrospun Medicated Nanofibers for Wound Healing: Review. <i>Membranes</i>, 11(10), Article 770. DOI: https://doi.org/10.3390/membranes11100770.4. Zhou, R., Ma, Y., Yang, M., Cheng, Y., Ma, X., Li, B., Zhang, Y., Cui, X., Liu, M., Long, Y., & Li, C. (2025). Wound dressings using electrospun nanofibers: mechanisms, applications, and future directions. <i>European Polymer Journal</i>, 231, Article 113900. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.113900. | <ol style="list-style-type: none">1. Wound Care Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Advanced, Surgical), By Application (Acute, Chronic), By End-use, By Mode of Purchase, By Distribution Channel, By Region, And Segment Forecasts, 2023–2030. Grand View Research, 2023. 200 p.2. Wound Dressing Market (2024–2030): Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Traditional Dressing, Advanced Dressing), By Application (Chronic Wounds, Acute Wounds), By End-use, By Region, And Segment Forecasts. Grand View Research, Inc. 2024. 140 p.3. Liu X., Xu H., Zhang M., Yu D.-G. Electrospun Medicated Nanofibers for Wound Healing: Review. <i>Membranes</i>. 2021. Vol. 11, No. 10. Article 770. DOI: https://doi.org/10.3390/membranes11100770.4. Zhou R., Ma Y., Yang M., Cheng Y., Ma X., Li B., Zhang Y., Cui X., Liu M., Long Y., Li C. Wound dressings using electrospun nanofibers: mechanisms, applications, and future directions. <i>European Polymer Journal</i>. 2025. Vol. 231. Article 113900. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.113900. |
|--|---|

5. Yang, J., & Xu, L. (2023). Electrospun Nanofiber Membranes with Various Structures for Wound Dressing. *Materials*, 16(17), Article 6021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16176021>.
6. Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. (2019). Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. *Chemical Reviews*, 119(8), 5298–5415. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>.
7. Taylor, G. I. (1969). Electrically Driven Jets. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515), 453–475. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0205>.
8. Liashok, I., & Sikora, A. (2025). Doslidzhennia vlastyvostei materialiv vyhotovlenykh metodom elektroformuvannia z rozchyniv PVS na osnovi roslynnykh ekstraktiv [Research on the properties of materials prepared by electrospinning from PVA solutions based on plant extracts]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359(6.1), 426–431. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-60> [in Ukrainian].
9. Ramamoorthy, R., Andra, S., Balu, S. K., Damiri, F., Krishnan, N. G., Andiappan, M., Muthalagu, M., & Berrada, M. (2023). Flavonoids, phenolics, and tannins loaded polycaprolactone nanofibers (NF) for wound dressing applications. *Results in Materials*, (18), Article 100407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100407>.
10. Jaskólski, M., Paczkowska-Walendowska, M., Miklaszewski, A., & Cielecka-Piontek, J. (2025). Ashwagandha: Optimizing the Extraction and Electrospun Nanofiber Production. *Pharmaceutics*, 17(1), Article 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17010061>.
11. Madhaiyan, M., Selvam, S. N., Manivannan, P., Sattu, K., Nallasamy, D., & Periyasamy, P. (2025). Fabrication of poly (vinyl alcohol)/Argenome mexicana extract composite nanofibers by electrospinning for antifungal and antimicrobial exploits. *Chemical Physics Impact*, (10), Article 100860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2025.100860>.
12. Guo, S., Jiang, W., Shen, L., Zhang, G., Gao, Y., Yang, Y., & Yu, D. G. (2022). Electrospun Hybrid Films for Fast and Convenient Delivery of Active Herb Extracts. *Membranes*, 12(4), Article 398. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12040398>.
13. Idjan, M. K. N. A., Fatmawati, Almafie, M. R., Dani, R., Subandrate, Fudholi, A., & Sriyanti, I. (2025). Physicochemical properties and antioxidant activity of PVP/CA membranes nanofiber loaded *Arcangelisia flava* L. Merr. stem extract using electrospinning technique. *Next Materials*, (8),
5. Yang J., Xu L. Electrospun Nanofiber Membranes with Various Structures for Wound Dressing. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 17. Article 6021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16176021>.
6. Xue J., Wu T., Dai Y., Xia Y. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. *Chemical Reviews*. 2019. Vol. 119, No. 8. P. 5298–5415. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>.
7. Taylor G. I. Electrically Driven Jets. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1969. Vol. 313, No. 1515. P. 453–475. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0205>.
8. Ляшок І., Сікора А. Дослідження властивостей матеріалів виготовлених методом електроформування з розчинів ПВС на основі рослинних екстрактів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. Т. 359, № 6.1. С. 426–431. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-60>.
9. Ramamoorthy R., Andra S., Balu S. K., Damiri F., Krishnan N. G., Andiappan M., Muthalagu M., Berrada M. Flavonoids, phenolics, and tannins loaded polycaprolactone nanofibers (NF) for wound dressing applications. *Results in Materials*. 2023. Vol. 18. Article 100407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100407>.
10. Jaskólski M., Paczkowska-Walendowska M., Miklaszewski A., Cielecka-Piontek J. Ashwagandha: Optimizing the Extraction and Electrospun Nanofiber Production. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17, No. 1. Article 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17010061>.
11. Madhaiyan M., Selvam S. N., Manivannan P., Sattu K., Nallasamy D., Periyasamy P. Fabrication of poly (vinyl alcohol)/Argenome mexicana extract composite nanofibers by electrospinning for antifungal and antimicrobial exploits. *Chemical Physics Impact*. 2025. Vol. 10. Article 100860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2025.100860>.
12. Guo S., Jiang W., Shen L., Zhang G., Gao Y., Yang Y., Yu D. G. Electrospun Hybrid Films for Fast and Convenient Delivery of Active Herb Extracts. *Membranes*. 2022. Vol. 12, No. 4. Article 398. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12040398>.
13. Idjan M. K. N. A., Fatmawati, Almafie M. R., Dani R., Subandrate, Fudholi A., Sriyanti, I. Physicochemical properties and antioxidant activity of PVP/CA membranes nanofiber loaded *Arcangelisia flava* L. Merr. stem extract using electrospinning technique. *Next Materials*. 2025. Vol.

- | | |
|---|--|
| <p>Article 100839. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100839.
14. Akram, M. W., Hoque, M. M. U., Miah, M. S., Shahid, M. A., Hossain, M. F., & Mahmud, S. H. (2023). Fabrication and characterization of antimicrobial wound dressing nanofibrous materials by PVA-betel leaf extract. <i>Heliyon</i>, 9(7), Article e17961. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17961.
15. Maleki, H., Doostan, M., Khoshnevisan, K., Baharifar, H., Maleki, S. A., & Fatahi, M. A. (2024). Zingiber officinale and thymus vulgaris extracts co-loaded polyvinyl alcohol and chitosan electrospun nanofibers for tackling infection and wound healing promotion. <i>Heliyon</i>, 10(1), Article e23719. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23719.
16. Wutticharoenmongkol, P., Narin, N., & Rungnoree, K. (2025). Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Nanofibers Containing Siam Weed Crude Extract as Potential Wound Dressings. <i>Rattanakosin Journal of Science and Technology</i>, 7(1), 102–114.
17. Tharakeswari, S., Shobana, R. K., Reena Sharon, R., Shrivatsan, V., & Ashik Ahamed, H. (2025). Development and characterization of Abutilon indicum (Indian mallow) leaf extract loaded electrospun nanofibers. <i>Journal of Bioactive and Compatible Polymers</i>, 40(1), 84–93. DOI: https://doi.org/10.1177/08839115241287218.
18. Paczkowska-Walendowska, M., Miklaszewski, A., Michniak-Kohn, B., & Cielecka-Piontek, J. (2023). The Antioxidant Potential of Resveratrol from Red Vine Leaves Delivered in an Electrospun Nanofiber System. <i>Antioxidants</i>, 12(9), Article 1777. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox12091777.
19. Shahid, M. A., Khan, M. S., & Hasan, M. M. (2022). Licorice extract-infused electrospun nanofiber scaffold for wound healing. <i>OpenNano</i>, 8, Article 100075. DOI: 10.1016/j.onano.2022.100075
20. Dumitriu, R. P., Brebu, M., Rusu, D., Slimestad, R., Rosnes, J. T., Sharmin, N., Sim, S. F., & Stoleru, E. (2025). Synergistic action of chaotropic agents on the partial casein unfolding and solution stabilization for improved electrospinnability and herb extract loading. <i>International Journal of Biological Macromolecules</i>, 321(Part 1), Article 146208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146208.
21. Liu, C., Wang, Y., Wang, P., Gong, Y., Yi, B., Ruan, J., & Wang, X. (2023). In situ electrospun aloe-nanofiber membrane for chronic wound healing. <i>Smart Materials in Medicine</i>, 4, 514–521. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smaim.2023.03.003.
22. Truong, D. H., Nguyen, D. H., Ta, N. T. A., Bui, A. V., Do, T. H., & Nguyen, H. C. (2019). Evaluation</p> | <p>8. Article 100839. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100839.
14. Akram M. W., Hoque M. M. U., Miah M. S., Shahid M. A., Hossain M. F., Mahmud S. H. Fabrication and characterization of antimicrobial wound dressing nanofibrous materials by PVA-betel leaf extract. <i>Heliyon</i>. 2023. Vol. 9, No. 7. Article e17961. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17961.
15. Maleki H., Doostan M., Khoshnevisan K., Baharifar H., Maleki S. A., Fatahi M. A. Zingiber officinale and thymus vulgaris extracts co-loaded polyvinyl alcohol and chitosan electrospun nanofibers for tackling infection and wound healing promotion. <i>Heliyon</i>. 2024. Vol. 10, No. 1. Article e23719. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23719.
16. Wutticharoenmongkol P., Narin N., Rungnoree K. Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Nanofibers Containing Siam Weed Crude Extract as Potential Wound Dressings. <i>Rattanakosin Journal of Science and Technology</i>. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 102–114.
17. Tharakeswari S., Shobana R. K., Reena Sharon R., Shrivatsan V., Ashik Ahamed H. Development and characterization of Abutilon indicum (Indian mallow) leaf extract loaded electrospun nanofibers. <i>Journal of Bioactive and Compatible Polymers</i>. 2025. Vol. 40, No. 1. P. 84–93. DOI: https://doi.org/10.1177/08839115241287218.
18. Paczkowska-Walendowska M., Miklaszewski A., Michniak-Kohn B., Cielecka-Piontek J. The Antioxidant Potential of Resveratrol from Red Vine Leaves Delivered in an Electrospun Nanofiber System. <i>Antioxidants</i>. 2023. Vol. 12, No. 9. Article 1777. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox12091777.
19. Shahid M. A., Khan M. S., Hasan M. M. Licorice extract-infused electrospun nanofiber scaffold for wound healing. <i>OpenNano</i>. 2022. Vol. 8, Article 100075. DOI: https://doi.org/10.1016/j.onano.2022.100075.
20. Dumitriu R. P., Brebu M., Rusu D., Slimestad R., Rosnes J. T., Sharmin N., Sim S. F., Stoleru E. Synergistic action of chaotropic agents on the partial casein unfolding and solution stabilization for improved electrospinnability and herb extract loading. <i>International Journal of Biological Macromolecules</i>. 2025. Vol. 321, Part 1. Article 146208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146208.
21. Liu C., Wang Y., Wang P., Gong Y., Yi B., Ruan J., Wang X. In situ electrospun aloe-nanofiber membrane for chronic wound healing. <i>Smart Materials in Medicine</i>. 2023. Vol. 4. P. 514–521. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smaim.2023.03.003.
22. Truong D. H., Nguyen D. H., Ta N. T. A., Bui A. V., Do T. H., Nguyen H. C. Evaluation of the Use of</p> |
|---|--|

- of the Use of Different Solvents for Phytochemical Constituents, Antioxidants, and In Vitro Anti-Inflammatory Activities of *Severinia buxifolia*. *Journal of Food Quality*, 2019(1), Article 8178294. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8178294>.
23. International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use (ICH). (2024). ICH Q3C (R9) Guideline on impurities: guideline for residual solvents.
24. Mwiiri, F. K., & Daniels, R. (2020). Influence of PVA Molecular Weight and Concentration on Electrospinnability of Birch Bark Extract-Loaded Nanofibrous Scaffolds Intended for Enhanced Wound Healing. *Molecules*, 25(20), Article 4799. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25204799>.
25. Zelca, Z., Kukle, S., Janceva, S., & Vilcena, L. (2022). Propolis Integration Methods into Solutions for Highly Loaded Propolis Fibers by Needleless Electrospinning. *Molecules*, 27(7), Article 2311. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27072311>.
26. Li, Y., Xu, H., Zhao, W., Zhang, L., & Wu, S. (2025). Electrospun robust, biodegradable, bioactive, and nanostructured sutures to accelerate the chronic wound healing. *Biofabrication*, 17(2), Article 025006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/adacaf>.
27. Li, Y., Zhao, W., Chen, S., Zhai, H., & Wu, S. (2024). Bioactive electrospun nanoyarn-constructed textile dressing patches delivering Chinese herbal compound for accelerated diabetic wound healing. *Materials & Design*, 237, Article 112623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112623>.
28. Ayash, H., Esen, G., Sabuncu, E., Deniz, I., Akkuş, P., Yaşayan, G., Sipahi, H., Aydın, A., Davaran, S., & Hamitoğlu, M. (2025). Safety, Antimicrobial, Anti-Inflammatory and Wound Healing Activity of Mesoporous Silica Nanoparticles Incorporated in Electrospun Herbal-Loaded Chitosan-Based Nanofibers. SSRN. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5185759>.
29. Ebrahimi, S. R., Nikbakht, M., Abadi, M. S. S., Gholipour, A., Bagheri, M., & Validi, M. (2025). Investigation of biocompatibility and antibacterial properties of electrospun chitosan/ polyethylene oxide -based scaffolds containing propolis extract against *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus epidermidis*. *Heliyon*, 11(3), Article e42228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42228>.
30. Abadehie, F. S., Dehkordi, A. H., Zafari, M., Bagheri, M., Yousefiasl, S., Pourmotabed, S., Mahmoodnia, L., Validi, M., Ashrafizadeh, M., Zare, E. N., Rabiee, N., Makvandi, P., & Sharifi, E. (2021). Different Solvents for Phytochemical Constituents, Antioxidants, and In Vitro Anti-Inflammatory Activities of *Severinia buxifolia*. *Journal of Food Quality*. 2019. Vol. 2019, No. 1. Article 8178294. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8178294>.
23. International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use (ICH). ICH Q3C (R9) Guideline on impurities: guideline for residual solvents. 2024.
24. Mwiiri F. K., Daniels R. Influence of PVA Molecular Weight and Concentration on Electrospinnability of Birch Bark Extract-Loaded Nanofibrous Scaffolds Intended for Enhanced Wound Healing. *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 20. Article 4799. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25204799>.
25. Zelca Z., Kukle S., Janceva S., Vilcena L. Propolis Integration Methods into Solutions for Highly Loaded Propolis Fibers by Needleless Electrospinning. *Molecules*. 2022. Vol. 27, No. 7. Article 2311. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27072311>.
26. Li Y., Xu H., Zhao W., Zhang L., Wu S. Electrospun robust, biodegradable, bioactive, and nanostructured sutures to accelerate the chronic wound healing. *Biofabrication*. 2025. Vol. 17, No. 2. Article 025006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/adacaf>.
27. Li Y., Zhao W., Chen S., Zhai H., Wu S. Bioactive electrospun nanoyarn-constructed textile dressing patches delivering Chinese herbal compound for accelerated diabetic wound healing. *Materials & Design*. 2024. Vol. 237. Article 112623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112623>.
28. Ayash H., Esen G., Sabuncu E., Deniz I., Akkuş P., Yaşayan G., Sipahi H., Aydın A., Davaran S., Hamitoğlu M. Safety, Antimicrobial, Anti-Inflammatory and Wound Healing Activity of Mesoporous Silica Nanoparticles Incorporated in Electrospun Herbal-Loaded Chitosan-Based Nanofibers. SSRN, 2025. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5185759>.
29. Ebrahimi S. R., Nikbakht M., Abadi M. S. S., Gholipour A., Bagheri M., Validi M. Investigation of biocompatibility and antibacterial properties of electrospun chitosan/ polyethylene oxide -based scaffolds containing propolis extract against *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus epidermidis*. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, No. 3. Article e42228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42228>.
30. Abadehie F. S., Dehkordi A. H., Zafari M., Bagheri M., Yousefiasl S., Pourmotabed S., Mahmoodnia L., Validi M., Ashrafizadeh M., Zare E. N., Rabiee N., Makvandi P., Sharifi E. Lawsone-

Lawson-encapsulated chitosan/polyethylene oxide nanofibrous mat as a potential antibacterial biobased wound dressing. *Engineered Regeneration*, 2, 219–226. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.01.001>.

31. Xu, R., Wang, P., Cao, C., Cai, M., Dai, X., Peng, Y., Yue, Y., Sun, Y., Gao, H., Song, P., & Li, N. (2025). Janus double-sided nanofibrous patch with asymmetric wettability and controlled topical delivery of tryptanthrin and indirubin as an effective therapy for psoriasis. *Materials Today Bio*, 32, Article 101822. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101822>.

32. Aramwit, P., Muangman, P., Namviriyachote, N., & Srichana, T. (2010). In Vitro Evaluation of the Antimicrobial Effectiveness and Moisture Binding Properties of Wound Dressings. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(8), 2864–2874. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ijms11082864>.

encapsulated chitosan/polyethylene oxide nanofibrous mat as a potential antibacterial biobased wound dressing. *Engineered Regeneration*. 2021. Vol. 2. P. 219–226. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.01.001>.

31. Xu R., Wang P., Cao C., Cai M., Dai X., Peng Y., Yue Y., Sun Y., Gao H., Song P., Li N. Janus double-sided nanofibrous patch with asymmetric wettability and controlled topical delivery of tryptanthrin and indirubin as an effective therapy for psoriasis. *Materials Today Bio*. 2025. Vol. 32. Article 101822. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101822>.

32. Aramwit P., Muangman P., Namviriyachote N., Srichana T. In Vitro Evaluation of the Antimicrobial Effectiveness and Moisture Binding Properties of Wound Dressings. *International Journal of Molecular Sciences*. 2010. Vol. 11, No. 8. P. 2864–2874. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ijms11082864>.

LIASHOK IRINA

PhD, Associate Professor,

Department of Chemical Technologies and Resource Saving of the Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9171-1075>

Scopus Author ID: 6508201621

E-mail: lyashok.io@knutd.edu.ua

SIKORA ANDRII

Postgraduate Student,

Department of Chemical Technologies and Resource Saving of the Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-0517-121X>

E-mail: andsikroa@meta.ua

Irina LIASHOK, Andrii SIKORA

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ELECTROSPUN ULTRATHIN FIBROUS MATERIALS WITH PLANT EXTRACTS: TECHNOLOGICAL FEATURES AND PROSPECTS FOR MEDICAL APPLICATIONS

Purpose. Identification of the main technological approaches to the production of ultrathin fibrous materials containing biologically active components of plant origin by electrospinning, and assessment of the prospects for their use as functional materials for medical applications.

Methodology. An analysis of recent scientific publications on the production of electrospun UFM s containing plant-derived components was conducted. Methods for the preparation and extraction of plant raw materials, types of polymer matrices, process parameters and electrospinning methods, as well as methods for evaluating the biological properties of the resulting materials, were considered.

Findings. It has been established that water, ethanol, and methanol are most commonly used to obtain plant extracts, and the choice of extractant determines the composition of the extracted biologically active substances; among the polymer matrices analyzed, PVA is the most commonly used; the incorporation of plant components makes it possible to obtain UFM s with antibacterial, antifungal, and antioxidant activity. The possibility of using capillary, needleless, and coaxial electrospinning methods is discussed.

Originality. A comprehensive approach to systematizing technological solutions for the production of electrospun ultrathin fibrous materials containing plant-derived components is proposed.

Practical value. The results presented here can be used in planning experimental studies, particularly when selecting plant raw materials, extraction methods, polymer matrices, and technological approaches for producing electrospun materials for medical use. The identified technological features can be taken into account when developing functional fibrous materials containing medicinal plant components, particularly promising wound dressings.

Keywords: electrospinning; plant extracts; biological activity; wound dressings; polymer matrices; extraction.