



Використання технології електроформування для отримання високорозчинного протизапального фармацевтичного інгредієнта шляхом формування твердих дисперсних систем

О. В. Іщенко^{id} A,C,F, М. В. Єганян^{id} B,E,C,D

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

A – концепція та дизайн дослідження; B – збір даних; C – аналіз та інтерпретація даних; D – написання статті; E – редагування статті; F – остаточне затвердження статті

Обмежена розчинність значної кількості активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) – чинник, що знижує їхню біодоступність. У зв'язку з цим пошук ефективних підходів до покращення розчинності АФІ залишається актуальним напрямом сучасної фармацевтичної науки. Одним із перспективних напрямів подолання проблеми низької розчинності АФІ є застосування технології твердих дисперсних систем (ТДС), у яких активна речовина рівномірно розподіляється в полімерній матриці. Особливу увагу привертає створення таких систем у формі нетканих матеріалів на основі ультратонких волокон, що забезпечує високу площу поверхні та сприяє покращенню розчинності. Електроформування передбачає використання електростатичного поля для отримання нетканих матеріалів з ультратонких волокон із розчину або розплаву, що забезпечує контроль їх морфології. Аналіз наукових джерел підтвердив можливість застосування цієї технології для створення твердих дисперсних систем із покращеною розчинністю АФІ різних фармакологічних груп. Вибір умов електроформування залежить від вимог до морфології нетканих матеріалів, їхніх механічних характеристик, виробничих масштабів та економічних чинників.

Мета роботи – дослідження можливостей технології електроформування для створення ТДС із покращеною розчинністю АФІ.

Матеріали і методи. Огляд підготовлено на основі аналізу наукових публікацій, що висвітлюють використання технології електроформування для створення ТДС із покращеною розчинністю АФІ. Джерела добирали, враховуючи релевантність теми, наукову новизну, відомості щодо типів полімерних матриць і АФІ, параметрів процесу електроформування, методів оцінювання розчинності та прикладів практичного впровадження цієї технології у фармацевтичну розробку.

Результати. Аналіз наукових джерел показав, що технологія електроформування є ефективним методом створення твердих дисперсних систем із покращеною розчинністю АФІ. Правильний підбір полімеру й оптимізація технологічних параметрів забезпечують рівномірний розподіл АФІ у волокнах, визначають морфологію та властивості матеріалу, впливаючи на швидкість вивільнення та біодоступність. Підтверджено високий потенціал цієї технології як інноваційного підходу у фармацевтичній розробці.

Висновки. Технологія електроформування є перспективним методом створення ТДС для покращення розчинності АФІ. Оптимальний вибір полімерної матриці та параметрів процесу сприяє рівномірному розподілу речовини у волокнах і підвищує швидкість розчинення, біодоступність.

Ключові слова: тверді дисперсні системи, неткані матеріали, ультратонкі волокна, електроформування, активний фармацевтичний інгредієнт, методи підвищення розчинності, полімери.

Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики. 2025. Т. 18, № 3(49). С. 350-355

Application of electrospinning and centrifugal fibre formation technologies to create highly soluble solid dispersed systems containing active pharmaceutical ingredients

O. V. Ishchenko, M. V. Yeganyan

Limited solubility of a significant number of active pharmaceutical ingredients (APIs) is a substantial issue that reduces their bioavailability. Consequently, the search for effective approaches to enhance API solubility remains a relevant focus in modern pharmaceutical science. One of the promising strategies to overcome the problem of low API solubility is the use of solid dispersion systems (SDSs), in which the active substance is uniformly distributed within a polymer matrix. Particular attention is drawn to the creation of such systems in the form of nonwoven materials based on ultrafine fibres, which provide a high surface area and promote solubility improvement. Electrospinning involves the use of an electrostatic field to produce nonwoven materials made of ultrafine fibres from a solution or melt, enabling control over their morphology. A review of scientific sources confirms the application of this technology for developing solid dispersion systems with

ARTICLE INFO



UDC 615.31: 615.276.014.47:677.494:544.773.4
DOI: [10.14739/2409-2932.2025.3.338050](https://doi.org/10.14739/2409-2932.2025.3.338050)

Current issues in pharmacy and medicine: science and practice. 2025;18(3):350-355

Keywords: solid dispersion systems, nonwoven materials, ultrafine fibres, electrospinning, active pharmaceutical ingredient, solubility enhancement methods, polymers.

Received: 14.07.2025 // Revised: 25.08.2025 // Accepted: 12.09.2025

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the [Creative Commons CC BY 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

improved solubility of APIs from various pharmacological groups. The selection of electrospinning parameters depends on the requirements for the morphology of nonwoven materials, their mechanical properties, production scale, and economic factors.

The aim: to investigate the potential of electrospinning technology for the development of SDSs with improved solubility of APIs.

Materials and methods. The review was prepared based on an analysis of scientific and patent publications covering the use of electrospinning technology to produce SDS with enhanced API solubility. Source selection considered topic relevance, scientific novelty, data reliability, and completeness of results description. The subsequent analysis involved systematizing information on types of polymer matrices and APIs, electrospinning process parameters, solubility evaluation methods, and examples of the practical implementation of the technology in pharmaceutical development.

Results. Analysis of the scientific literature has shown that electrospinning technology is an effective method for producing solid dispersion systems with improved API solubility. Appropriate polymer selection and optimization of process parameters ensure uniform API distribution within the fibres, determine the morphology and properties of the material, and influence the dissolution rate and bioavailability. Literature data confirm the high potential of this technology as an innovative approach in pharmaceutical development.

Conclusions. Electrospinning technology is a promising method for creating SDS to improve API solubility. An optimal choice of polymer matrix and process parameters ensures uniform distribution of the substance within the fibres and increases both dissolution rate and bioavailability.

Keywords: solid dispersion systems, nonwoven materials, ultrafine fibres, electrospinning, active pharmaceutical ingredient, solubility enhancement methods, polymers.

Current issues in pharmacy and medicine: science and practice. 2025;18(3):350-355

Розчинність належить до ключових фізико-хімічних параметрів, що визначають біодоступність лікарських речовин. Низька розчинність нових активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) є поширеним обмежувальним чинником, що може істотно знижувати фармакологічну активність і терапевтичну ефективність АФІ. За даними наукових джерел, до 90 % перспективних сполук на етапі розробки та майже 40 % АФІ, що містяться у складі комерційних препаратів, характеризуються недостатньою розчинністю [1,2].

Тому розроблення ефективних методів підвищення розчинності є одним із пріоритетних напрямів сучасних фармацевтичних досліджень, що безпосередньо впливає на створення лікарських форм із прогнозованими фармакокінетичними властивостями та високою терапевтичною цінністю.

Мета роботи

Дослідження можливостей технології електроформування для створення твердих дисперсних систем із покращеною розчинністю АФІ.

Матеріали і методи дослідження

Огляд підготовлено на основі ретельного аналізу наукових публікацій, у яких розглянуто питання щодо застосування технології електроформування для розроблення твердих дисперсних систем (ТДС) з підвищеною розчинністю АФІ.

Джерела для огляду обирали, враховуючи релевантність тематики, наукову новизну, опис експериментальних результатів. При цьому перевагу віддавали працям, що містили методичні відомості, мали структурований експериментальний дизайн, а їхні результати можна було застосувати на практиці. Особливу увагу приділено дослідженням, у яких простежено зв'язок між параметрами процесу формування ТДС, морфологією волокон і показниками розчинності АФІ.

Подальший аналіз передбачав узагальнення даних про полімерні матриці, характеристики АФІ, параметри електроформування та методи оцінювання розчинності. Це дало змогу визначити ключові чинники, узагальнити кращі практики й окреслити перспективи підвищення біодоступності малорозчинних сполук, зокрема методом електроформування.

Результати

Розроблено низку фармацевтичних технологій, які ефективно застосовують для збільшення розчинності та підвищення біодоступності великої кількості малорозчинних АФІ. Як такі підходи визначають фізичні, хімічні, а також окремі технологічні прийоми [3,4,5]. Серед них розрізняють:

- зменшення розміру частинок (мікронізація) – збільшує площу поверхні, що може сприяти швидшому розчиненню;
- перетворення АФІ з кристалічної форми в аморфний стан;
- ліпідні системи – використання самоемульгуючих систем доставки ліків (SEDSS) або твердих ліпідних наночастинок (SLN) підвищує розчинність і біодоступність;
- технологія твердих дисперсних систем – застосування поверхнево активних речовин для покращення змочування та розчинення лікарських засобів.

Серед названих підходів технологію ТДС визначають як одну з найефективніших стратегій підвищення розчинності АФІ, малорозчинних у воді. ТДС – композиційні матеріали, зазвичай двокомпонентні; активна речовина у них рівномірно розподілена на молекулярному рівні в полімерному носії. Властивості отриманої композиції залежать від типу полімеру, який використовують для формування ТДС [3,6].

Тверді дисперсні системи отримують шляхом плавлення, гарячої екструзії, випаровування розчинника (зокрема розпилювального та сублімаційного сушіння),

а також механічного подрібнення без розчинників [6]. Найбільш перспективними для промислового застосування є екструзія, сушіння та видалення розчинника. Ці методи формування ТДС мають високий потенціал в аспекті ефективності та придатності до промислового масштабування. Це підтверджено прикладами комерційно доступних лікарських засобів на основі ТДС, створених за цими методами, зокрема Kaletra® (Abbott Laboratories), Zortress® (Novartis), Belsomra® (Merck), Epcusa® (Gilead Sciences), Symdeko® (Vertex) тощо [7]. Втім, незважаючи на очевидні переваги таких підходів, хіміко-фармацевтична галузь досі потребує розробки нових інноваційних технологій для отримання ТДС із покращеною біодоступністю АФІ.

Останнім часом здійснюють чимало досліджень, що спрямовані на розроблення ТДС у формі нетканних матеріалів з ультратонких волокон, які можуть суттєво покращити розчинність і біодоступність АФІ. Завдяки комбінації високої пористості, контрольованої змочуваності та адаптивних механічних властивостей неткані матеріали, сформовані з ультратонких волокон зі специфічною структурою, є перспективними для ефективного транспортування активних речовин, сприяючи їх належному всмоктуванню та стабільності.

Аналіз відомостей сучасної наукової літератури дав змогу встановити, що електроформування є одним із найпоширеніших методів створення твердих дисперсних систем [8,9]. Ця технологія дає змогу отримувати неткані матеріали з ультратонких волокон із контрольованими фізичними характеристиками, включаючи кількість і розмір пор, морфологію та розподіл активних фармацевтичних інгредієнтів у полімерній матриці. Форма нано- або мікротонких волокон визначається типом полімерного розчину – водним, розплавленим чи емульсійним.

Дослідження спрямовані на оптимізацію ключових параметрів процесу створення ТДС: напруги, швидкості подачі, відстані до колектора та складу розчину, – адже вони безпосередньо впливають на властивості ТДС, а отже і на розчинність, біодоступність АФІ [8,9].

Останнім часом актуалізується технологія створення ТДС у формі нетканого матеріалу з ультратонких волокон шляхом електророзпилення розчину АФІ з обраним полімером у відповідному розчиннику. Електроформування визначено як перспективну технологію для створення ТДС із малорозчинними субстанціями. Метод дає змогу отримувати нановолокна з високою пористістю та великою площею поверхні, що підвищує розчинність і біодоступність АФІ. Електроформування забезпечує швидке висушування, сумісність із термолабільними сполуками та можливість формування складних наноструктур. Отримані дисперсні системи характеризуються стабільною аморфною формою, рівномірним розподілом АФІ у полімерній матриці та контрольованим вивільненням. Крім того, технологія дає змогу поєднувати електричну енергію з тепловою, механічною або ультразвуковою дією для оптимізації процесу. Отже, електроформування є перспективним щодо розроблення

пероральних форм препаратів із малорозчинним АФІ з програмованими властивостями вивільнення [10,11].

Цей метод електроформування є перспективним для отримання високорозчинних фармацевтичних форм, дає змогу створювати неткані матеріали або волокнисті структури з контрольованими фізико-хімічними властивостями. Це сприяє покращенню біодоступності АФІ.

Електроформування – універсальна та ефективна технологія, що дає змогу отримувати ультратонкі волокна або волокнисті ТДС у мікро- та нанометричному діапазоні, забезпечуючи точний контроль морфології поверхні [12]. Електроформування полягає у подачі полімерного розчину або розплаву, що містить АФІ, через капіляр із заданою швидкістю, під час якого під дією електростатичного поля високої напруги виникають сили відштовхування між одноіменно зарядженими частинками та притягання між зарядженою рідиною і заземленим колектором. Коли досягнуто критичного рівня напруги, меніск деформується, утворюючи конус Тейлора, з вершини якого вивільняється струмінь полімерного розчину. У процесі його руху до колектора відбувається витягування та зменшення діаметра, а випаровування розчинника призводить до формування твердого матеріалу – нетканого матеріалу, що складається з ультратонких волокон [12,13].

При електроформуванні ТДС у формі нетканого матеріалу важливо, щоб АФІ та полімер добре розчинялися в обраному розчиннику й були сумісними. Вибір розчинника впливає на морфологію нетканого матеріалу та розчинність АФІ. Найчастіше використовують етанол, метанол, ацетон, хлороформ, диметилформамід тощо, застосовують і комбінації розчинників [14]. Оскільки розроблена ТДС призначена для фармацевтичного виробництва, ключовою характеристикою є використання малотоксичних розчинників та мінімізація їхньої кількості у готовому продукті до встановлених нормативами рівнів.

Вивільнення АФІ з електросформованих волокон залежить від властивостей полімерного носія, тому його вибір вкрай важливий. У процесі електроформування ТДС використовують фармацевтичні полімери (ПВП, ПЕГ, ПВС), природні (крохмаль, хітозан, альгінат натрію) [15,16] та біорозкладні синтетичні (PCL, PLGA, PLA) [17]. Вони не лише сприяють покращенню біодоступності АФІ, але й забезпечують контрольоване вивільнення.

Крім полімерного носія, процес формування ТДС залежить і від інших факторів, що наведено в *таблиці 1* [12,18,19].

Електроформування мало високу ефективність під час створення нетканних матеріалів і волокнистих ТДС, що суттєво покращують біодоступність активних фармацевтичних інгредієнтів. Так, P. Shinde et al. описали процес розроблення ультратонкого матеріалу методом електроформування з ресвератролом для локалізованої терапії раку молочної залози [20]. Щоб подолати низьку розчинність і нестабільність ресвератролу, його інкапсулювали у комплекс із сульфобутиловим ефіром

Таблиця 1. Перелік факторів, що впливають на отримання ТДС методом електроформування

Тип параметра	Параметр процесу	Результат
Склад полімерного розчину	Сумісність полімеру та АФІ	Сумісний полімер покращує розчинність АФІ, запобігаючи кристалізації та підтримуючи аморфний стан
	Концентрація компонентів	Вища концентрація розчину забезпечує утворення щільнішого та більш рівномірного матеріалу, а надто низька може спричинити нерівномірне покриття або утворення крапель
	Тип розчинника	Впливає на процес електроформування, визначаючи пористість і розчинність отриманих структур
Реологічні властивості	В'язкість	Визначає стабільність і морфологію отриманого матеріалу: вища в'язкість сприяє рівномірності та міцності, надмірна ускладнює розпилення, а надто низька порушує структуру
	Поверхневий натяг	Впливає на змочуваність і рівномірність отриманого матеріалу: високий поверхневий натяг ускладнює розтікання, низький покращує розподіл, але надмірне зниження може призвести до нестабільності
	Електропровідність розчину	Висока електропровідність покращує формування, але може спричинити неконтрольоване розпилення, низька обмежує рух іонів, впливаючи на морфологію та механічні властивості
Параметри електростатичного поля	Напруга	Напруга визначає морфологію нетканого матеріалу: висока сприяє рівномірності, але може спричинити дефекти; низька забезпечує контрольоване формування, але обмежує розтягнення полімеру
	Відстань голка – колектор	Збільшення відстані призводить до утворення неоднорідного матеріалу, а надмірне зменшення цієї дистанції може перешкоджати їх формуванню
Умови формування волокон	Швидкість подачі розчину	Зростання швидкості потоку може зумовлювати нестабільність конуса Тейлора
	Температура	Температура визначає в'язкість розчину й інтенсивність випаровування. Її підвищення зменшує в'язкість і прискорює процес випаровування розчинника
	Вологість	Вологість регулює випаровування розчинника: висока вологість може уповільнити процес і спричинити неповне висихання волокон
Процес випаровування розчинника	Швидкість висихання	Швидкість висихання впливає на морфологію нетканого матеріалу: висока сприяє рівномірності, а низька може призводити до дефектів

β-циклодекстрину та полівінілпіролідом (PVP K90). Полімери обирали на підставі результатів комп'ютерного моделювання, що дало змогу оцінити їхню взаємодію з діючою речовиною, а також брали до уваги результати досліджень стабільності у розчині. *In vitro* та *ex vivo* дослідження показали контрольоване вивільнення препарату, покращену проникність через шкіру та високу біосумісність. Антиоксидантна активність зберігалася, а цитотоксичні тести дали змогу встановити значно вищу протипухлинну ефективність наноструктурованої форми порівняно з чистим ресвератролом. Отже, запропонована платформа є перспективною для лікування раку молочної залози, але потребує продовження *in vivo* досліджень для підтвердження клінічного потенціалу [20].

Метод електроформування забезпечує стабільне формування волокнистих ТДС з лопінавіром і ритонавіром, ініціюючи перехід АФІ в аморфну форму, незалежно від їхнього вмісту та типу полімеру (ПВП K-30, Collidon® VA64, Eudragit® E100) [21].

Методом електроформування нановолокон із полівінілового спирту та хітозану з додаванням екстракту часнику *Allium sativum*, багатого на аліцин, створено ТДС для протипаразитарної терапії [22]. Волокна мали середній діаметр ≈430 нм, що забезпечило ефективну

інкапсуляцію аліцину та показало до 98,4 % смертності протосколексів *Echinococcus granulosus (in vitro)*, що перевершує дію чистого екстракту. Метод має потенціал для лікування ехінококозу.

У фаховій літературі повідомляли також про отримання ТДС у формі модульної пероральної платформи з доставки лікарських засобів на основі електроформованих волокон із гідроксипропілметилцелюлози та поліетиленоксиду. Автори створили двошарові швидкорозчинні матриці, де верхній шар містить інкапсульовані діючі речовини, а нижній забезпечує механічну стабільність. Волокна мали аморфну форму, характеризувалися швидким розчиненням та ефективним вивільненням. Це обґрунтовує їхню перспективність саме для персоналізованих пероральних форм із контрольованим профілем доставки [23].

Опубліковано дані щодо розроблення електроформованої мембрани з природних полімерів і кверцетину для лікування хронічних ран. Мембрани мають стабільну структуру, забезпечують контрольоване вивільнення біоактивного флавоноїду, чинять антиоксидантну й антимікробну дію, а також потенційно можуть стимулювати регенерацію тканин. Ця технологія є перспективним підходом для створення терапевтичних матеріалів у сфері регенеративної медицини [24].

Moydeen A. M. et al. розробили одноструменевий метод емульсійного електроформування для створення надтонких волокон зі структурою ядро – оболонка на основі полівінілпіролідону та декстрану з інкапсульованим ципрофлоксацином [25]. Вивільнення діючої речовини з отриманих волокон відбувається контролювано, переважно завдяки дифузійному механізму. Мікробіологічні тести показали ефективність отриманих ТДС проти деяких грампозитивних і грамнегативних патогенів. Отримані результати свідчать про потенційну ефективність таких волокон для лікування інфікованих ран із застосуванням антибіотиків.

Група дослідників із Китайського медичного університету Jinzhou повідомила про успішне отримання нановолокон Ag-гесперидину методом електроформування [26]. Як полімерний носій використано полівініловий спирт та альгінат натрію. Отримані нановолокна Ag-гесперидину мали високу антибактеріальну активність проти *S. aureus* та *E. coli* (ступінь інгібування – >90 %). Експерименти на клітинних моделях і дослідження загоєння ран у тварин показали, що ці нановолокна можуть прискорювати загоєння інфікованих ран. Імуногістохімічний аналіз підтвердив сприятливий вплив волокнистої ТДС Ag-гесперидину на процеси регенерації тканин [26].

Аналіз результатів найновіших досліджень підтверджує значний прогрес у застосуванні електроформування для створення високоточних структур і функціональних матеріалів. Однак, незважаючи на успіхи на лабораторному рівні, під час впровадження цієї технології у промислове виробництво перед фахівцями постає низка викликів.

Vass P. et al. здійснили дослідження з масштабування електроформування для фармацевтичної промисловості [27]. На підставі результатів, що одержано, автори описали виклики, які стримують перехід технології з лабораторного рівня до промислового виробництва. Як один із таких чинників дослідники визначили низьку продуктивність традиційного електроформування, оскільки класичні одно- або багатоголкові системи мають обмежену швидкість виробництва, що може не відповідати промисловим потребам. Додатковою проблемою є забезпечення відтворюваності процесу формування волокон із заданими параметрами. Крім того, процес електроформування є чутливим до змін температури, вологості, напруги та складу розчину.

Промислові бар'єри включають обмеженість у виборі стандартизованого обладнання, оскільки більшість промислових систем перебувають на стадії прототипів, а також чіткі регуляторні вимоги, що передбачають відповідність процесу вимогам GMP і необхідність валідації процесу. Крім того, економічна доцільність залишається сумнівною через високу вартість обладнання та електричної енергії.

Подолання цих викликів потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує матеріалознавство, фармацевтику, інженерію та регуляторну експертизу, аби забезпечити успішне впровадження електроформування у виробництво лікарських форм.

Висновки

1. Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі фармацевтичних технологій свідчить про активний розвиток підходів, спрямованих на підвищення розчинності, а отже й біодоступності малорозчинних і нерозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів. Серед них особливий науковий інтерес викликає технологія електроформування, що дає змогу створювати тверді дисперсні системи у формі нетканних матеріалів з ультратонких волокон.

2. Технологія електроформування на основі різних полімерних носіїв сприяє підвищенню біодоступності АФІ та забезпечує контроль над морфологією нетканого матеріалу з ультратонких волокон, отриманих шляхом електророзпилення.

3. Виклики, пов'язані з масштабуванням виробництва та необхідністю застосування високої напруги, можуть обмежувати промислове використання цього методу.

4. Оптимальні умови формування твердих дисперсних систем визначаються специфічними вимогами до кінцевого продукту та обсягами виробництва.

Перспективи подальших досліджень. Електроформування має значний науковий і практичний потенціал для наступних досліджень, спрямованих на вдосконалення технологій створення твердих дисперсних систем із покращеною розчинністю широкого спектра активних фармацевтичних інгредієнтів.

Фінансування

Дослідження здійснено без фінансової підтримки.

Конфлікт інтересів: відсутній.

Conflicts of interest: authors have no conflict of interest to declare.

Відомості про авторів:

Іщенко О. В., д-р техн. наук, доцент, професор каф. промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

ORCID ID: 0000-0002-9510-6005

Єганян М. В., аспірант каф. промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

ORCID ID: 0009-0000-1246-6594

Information about the authors:

Ishchenko O. V., PhD, DSc, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Pharmacy, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine.

Yeganyan M. V., PhD student, Department of Industrial Pharmacy, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine.



Олена Іщенко (Olena Ishchenko)

ishchenko.ov@knuutd.com.ua

References

1. Bessarabov V, Kostyuk V, Lyzhniuk V, Lisovy V, Smishko R, Kuzmina G, Gureyeva S, Goy A. "Green" technology of centrifugal fiber formation of solid dispersed systems of nimesulide: Evaluation of solubility increases and physicochemical characteristics. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2025;43:101913. doi: 10.1016/j.scp.2025.101913

2. Zhang X, Xing H, Zhao Y, Ma Z. Pharmaceutical Dispersion Techniques for Dissolution and Bioavailability Enhancement of Poorly Water-Soluble Drugs. *Pharmaceutics*. 2018;10(3):74. doi: [10.3390/pharmaceutics10030074](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10030074)
3. Patel K, Shah S, Patel J. Solid dispersion technology as a formulation strategy for the fabrication of modified release dosage forms: A comprehensive review. *Daru*. 2022;30(1):165-89. doi: [10.1007/s40199-022-00440-0](https://doi.org/10.1007/s40199-022-00440-0)
4. Kumari L, Choudhari Y, Patel P, Gupta GD, Singh D, Rosenholm JM, et al. Advancement in Solubilization Approaches: A Step towards Bioavailability Enhancement of Poorly Soluble Drugs. *Life (Basel)*. 2023;13(5):1099. doi: [10.3390/life13051099](https://doi.org/10.3390/life13051099)
5. Brubaker I, Bilan O, Marchenko-Tolsta K. [Modern approaches to development of nano-systems for drug delivery]. *World Science*. 2020;6(58):32-7. doi: [10.31435/rsglobal_ws/30062020/7102](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30062020/7102)
6. Lisovyi VM, Lyzhniuk VV, Kostyuk VG, Pashchenko IO, Smishko RO, Goy AM. [Technologies for the obtaining highly soluble polymer composite materials with active pharmaceutical ingredients]. *Technologies and Engineering*. 2023;(3):26-35. Ukrainian. doi: [10.30857/2786-5371.2023.3.3](https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.3)
7. Zhang J, Guo M, Luo M, Cai T. Advances in the development of amorphous solid dispersions: The role of polymeric carriers. *Asian J Pharm Sci*. 2023;18(4):100834. doi: [10.1016/j.ajps.2023.100834](https://doi.org/10.1016/j.ajps.2023.100834)
8. Zare M, Dziemidowicz K, Williams GR, Ramakrishna S. Encapsulation of Pharmaceutical and Nutraceutical Active Ingredients Using Electrospinning Processes. *Nanomaterials (Basel)*. 2021;11(8):1968. doi: [10.3390/nano11081968](https://doi.org/10.3390/nano11081968)
9. Yu DG, Li JJ, Williams GR, Zhao M. Electrospun amorphous solid dispersions of poorly water-soluble drugs: A review. *J Control Release*. 2018;292:91-110. doi: [10.1016/j.jconrel.2018.08.016](https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.08.016)
10. Duan X, Chen HL, Guo C. Polymeric Nanofibers for Drug Delivery Applications: A Recent Review. *J Mater Sci Mater Med*. 2022;33(12):78. doi: [10.1007/s10856-022-06700-4](https://doi.org/10.1007/s10856-022-06700-4)
11. Marjuban SM, Rahman M, Duza SS, Ahmed MB, Patel DK, Rahman MS, et al. Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering. *Polymers (Basel)*. 2023;15(5):1253. doi: [10.3390/polym15051253](https://doi.org/10.3390/polym15051253)
12. Ahmadi Bonakdar M, Rodrigue D. Electrospinning: Processes, structures, and materials. *Macromol*. 2024;4(1):58-103. doi: [10.3390/macromol4010004](https://doi.org/10.3390/macromol4010004)
13. Kausar A, Ahmad I. Electrospinning processing of polymer/nanocarbon nanocomposite nanofibers – design, features, and technical compliances. *J Compos Sci*. 2023;7(7):290. doi: [10.3390/jcs7070290](https://doi.org/10.3390/jcs7070290)
14. Haider A, Haider S, Kang I-K. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arab J Chem*. 2018;11(8):1165-88. doi: [10.1016/j.arabjc.2015.11.015](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015)
15. Zhou X, Wang Y, Ji C. Advances in Preparation and Biomedical Applications of Sodium Alginate-Based Electrospun Nanofibers. *Gels*. 2025;11(9):704. doi: [10.3390/gels11090704](https://doi.org/10.3390/gels11090704)
16. Ishchenko O, Plavan V, Valeika V, Koliada M, Liashok I, Budash Y, et al. Modified starch in composition with polyvinyl alcohol as a basis for development of the polymeric materials for pharmaceutical use. *Starke*. 2022;74(9-10):2200062. doi: [10.1002/star.202200062](https://doi.org/10.1002/star.202200062)
17. Kai D, Liow SS, Loh XJ. Biodegradable polymers for electrospinning: towards biomedical applications. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2014;45:659-70. doi: [10.1016/j.msec.2014.04.051](https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.051)
18. Farhaj S, Conway BR, Ghori MU. Nanofibres in Drug Delivery Applications. *Fibers*. 2023;11(2):21. doi: [10.3390/fib11020021](https://doi.org/10.3390/fib11020021)
19. Topuz F, Uyar T. Recent developments in nanofiber-based fast-disintegrating drug delivery systems. *Expert Opin Drug Deliv*. 2025;22(7):957-69. doi: [10.1080/17425247.2025.2497831](https://doi.org/10.1080/17425247.2025.2497831)
20. Shinde P, Shete A, Ghorpade V, Harale N, Patil S, Desai N, et al. Formulation and development of resveratrol-loaded sulfobutylether β -cyclodextrin and PVP K90-based nanofiber mat via electrospinning for the breast cancer therapy. *J Pharm Innov*. 2025;20(2):38. doi: [10.1007/s12247-025-09956-9](https://doi.org/10.1007/s12247-025-09956-9)
21. Łyszczarz E, Sosna O, Srebro J, Rezka A, Majda D, Mendyk A. Electrospun Amorphous Solid Dispersions with Lopinavir and Ritonavir for Improved Solubility and Dissolution Rate. *Nanomaterials (Basel)*. 2024;14(19):1569. doi: [10.3390/nano14191569](https://doi.org/10.3390/nano14191569)
22. Kahdim QS, Abdulzahra AI, Saood AI, Al-Saaidi JA. Electrospun PVA/chitosan nanofibers loaded with garlic extract for in vitro antiparasitic activity against *Echinococcus granulosus* protoscoleces. *J Cluster Sci*. 2025;36(5):179. doi: [10.1007/s10876-025-02903-1](https://doi.org/10.1007/s10876-025-02903-1)
23. Cano-Vega MA, Lozano-Perez H, Pinal R, Deng M. Fast-dissolving electrospun cellulose fiber-based matrices as modular oral dosage forms. *J Pharm Sci*. 2025 Jul 18:103908. doi: [10.1016/j.xphs.2025.103908](https://doi.org/10.1016/j.xphs.2025.103908)
24. Correia C, Pádua AS, Matela C, Gonçalves IC, Soares P, Henriques C, et al. Electrospun membranes from natural polymers with Quercetin: design and characterization, antioxidant and antimicrobial activity, and potential for skin reinnervation in chronic wounds. *Int J Pharm*. 2025;683:126062. doi: [10.1016/j.ijpharm.2025.126062](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.126062)
25. Moydeen AM, Padusha MSA, Thamer BM, Ahamed N. A, Al-Enizi AM, El-Hamshary H, et al. Single-nozzle core-shell electrospun nanofibers of PVP/dextran as drug delivery system. *Fiber Polym*. 2019;20(10):2078-89. doi: [10.1007/s12221-019-9187-2](https://doi.org/10.1007/s12221-019-9187-2)
26. Ren X, Hu Y, Chang L, Xu S, Mei X, Chen Z. Electrospinning of antibacterial and anti-inflammatory Ag@hesperidin core-shell nanoparticles into nanofibers used for promoting infected wound healing. *Regen Biomater*. 2022;9:rbac012. doi: [10.1093/rb/rbac012](https://doi.org/10.1093/rb/rbac012)
27. Vass P, Szabó E, Domokos A, Hirsch E, Galata D, Farkas B, et al. Scale-up of electrospinning technology: Applications in the pharmaceutical industry. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*. 2020;12(4):e1611. doi: [10.1002/wnan.1611](https://doi.org/10.1002/wnan.1611)