

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.4.9>

Received: 13.08.2026
Revised: 29.09.2026
Accepted: 30.09.2026
Published: 05.10.2026

Олена ІЩЕНКО^{1,2}, Мікаел ЄГАНЯН¹

¹ Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

² Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

УДК 615.014.21:
615.453:620.3

РОЗПИЛЮВАЛЬНЕ СУШІННЯ, ВІДЦЕНТРОВЕ ФОРМУВАННЯ ВОЛОКОН ТА ЕЛЕКТРОФОРМУВАННЯ У СУЧАСНИХ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Мета. Метою роботи є узагальнення та порівняльний аналіз сучасних технологій отримання мікро- та наноструктурованих систем для фармацевтичного застосування: розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування. Особливу увагу приділено оцінці можливостей зазначених технологій щодо модифікації фізико-хімічних властивостей активних фармацевтичних інгредієнтів, підвищення їх біодоступності, а також перспектив практичного впровадження у фармацевтичне виробництво та розробку сучасних лікарських форм.

Методика. Дослідження виконано із застосуванням методів аналізу, систематизації та узагальнення даних наукової літератури. Проведено вивчення результатів сучасних досліджень, присвячених технологічним особливостям формування мікро- та наноструктурованих систем, характеристикам отримуваних матеріалів, а також впливу технологічних параметрів на структуру та властивості готового продукту. Порівняльний аналіз здійснювали за такими критеріями, як продуктивність процесу, можливість масштабування, контроль морфології частинок або волокон, вплив на стабільність активних речовин та перспективність використання у фармацевтичній практиці.

Результати. Аналіз літературних даних засвідчив, що розпилювальне сушіння є добре апробованою та широко впровадженою технологією отримання аморфних твердих дисперсних систем, що використовуються для покращення розчинності та біодоступності малорозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів. Відцентрове формування волокон характеризується високою продуктивністю, відсутністю необхідності використання високої напруги та значним потенціалом для масштабування виробничих процесів. Електроформування забезпечує отримання ультратонких волокон із розвинутою питомою поверхнею та високим ступенем контролю структурних характеристик матеріалу, що розширює можливості створення систем контрольованого та адресного вивільнення лікарських засобів. Визначено, що вибір конкретної технології залежить від властивостей активної речовини, вимог до кінцевої лікарської форми та особливостей виробничого процесу.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексному порівнянні трьох сучасних технологій формування мікро- та наноструктурованих фармацевтичних систем з урахуванням їх технологічних особливостей, морфологічних характеристик отримуваних матеріалів та можливостей практичного використання. Узагальнено актуальні відомості щодо переваг, обмежень і напрямів подальшого розвитку розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування у сфері фармацевтичної розробки.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані під час вибору оптимальної технології створення сучасних лікарських форм на основі мікро- та наноструктурованих систем. Представлені висновки становлять практичний інтерес для фахівців фармацевтичної галузі, науковців і розробників, які працюють над оптимізацією лікарських засобів та шукають інноваційні технологічні шляхи для рішення актуальних питань фармації.

Ключові слова: електроформування; розпилювальне сушіння; відцентрове формування волокон; тверді дисперсні системи; нановолокна; доставка лікарських засобів.

Вступ. В останні роки мікро- та наноструктуровані системи набули широкого поширення у фармацевтичних дослідженнях. Зростання інтересу до таких систем пов'язане з можливістю цілеспрямованого впливу на властивості активних фармацевтичних інгредієнтів, зокрема на їх розчинність, швидкість вивільнення та біодоступність. Крім фармації, мікро- та

наноструктуровані матеріали знаходять застосування у біомедицині, тканинній інженерії, системах контрольованої доставки лікарських засобів та інших галузях [1–3].

Актуальність даного напрямку зумовлена тим, що значна частина сучасних активних фармацевтичних інгредієнтів належить до сполук із низькою розчинністю у водному середовищі. Це може обмежувати їх всмоктування та знижувати терапевтичну ефективність готових лікарських засобів. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є використання мікро- та наноструктурованих систем, які дозволяють змінювати фізико-хімічні характеристики речовин та покращувати їх біофармацевтичні властивості [2, 4].

Для отримання таких систем застосовують різні технологічні підходи, серед яких – це розпилювальне сушіння, відцентрове формування волокон та електроформування. Кожна з цих технологій має власні особливості, переваги та обмеження. Розпилювальне сушіння широко використовується для отримання аморфних твердих дисперсних систем і мікрочастинок, відцентрове формування волокон характеризується високою продуктивністю та можливістю масштабування процесу, тоді як електроформування дозволяє отримувати волокнисті матеріали з високорозвиненою поверхнею та контрольованою структурою [5, 6].

Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених окремим технологіям, питання їх порівняння з погляду фармацевтичного застосування залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі. Тому узагальнення та систематизація наявних даних є доцільними для кращого розуміння можливостей використання зазначених технологій під час розробки сучасних лікарських форм.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз сучасних технологій розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування і оцінка можливостей їх використання для створення мікро- та наноструктурованих систем фармацевтичного призначення. У роботі розглянуто принципи роботи зазначених технологій, їх сильні та слабкі сторони, характеристики отримуваних матеріалів і перспективи їх практичного застосування у фармації та медицині.

Результати. Огляд підготовлено на основі аналізу наукових публікацій, у яких розглядаються технології розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування. До аналізу були включені оригінальні дослідження, оглядові статті та публікації, присвячені принципам роботи зазначених технологій, особливостям технологічних процесів, характеристикам отриманих матеріалів, а також можливостям їх застосування для підвищення біодоступності та контрольованого вивільнення лікарських речовин, та розробки сучасних систем доставки лікарських засобів.

Під час аналізу особливу увагу приділяли впливу технологічних параметрів на морфологію частинок і волокон, розподіл їх розмірів, ступінь аморфізації активних фармацевтичних інгредієнтів, ефективність інкапсуляції та стабільність готових систем. Порівняльний аналіз проводили за критеріями продуктивності, масштабованості, економічності доцільності, можливостей промислового впровадження та перспектив використання у фармацевтичній галузі.

За результатами аналізу наукових публікацій встановлено, що серед сучасних технологій отримання мікро- та наноструктурованих систем для фармацевтичного застосування найбільш перспективними є розпилювальне сушіння, відцентрове формування волокон та електроформування. Їхні принципи, переваги, обмеження та перспективи використання розглянуто нижче.

Розпилювальне сушіння є однією з найпоширеніших технологій у фармацевтичній промисловості завдяки можливості масштабування процесу, високій продуктивності та здатності формувати частинки із заданими морфологічними й функціональними властивостями. Метод широко застосовується для отримання аморфних твердих дисперсних систем (ТДС) та мікрокапсульованих систем із покращеними показниками розчинності й стабільності [2, 4].

Відцентрове формування волокон є технологією, яка базується на використанні відцентрових сил для утворення мікро- та нановолокон без застосування високої напруги. Цей метод характеризується високою продуктивністю та перспективністю масштабування для промислового виробництва. Одержані волокнисті матеріали демонструють значний потенціал для створення систем доставки лікарських засобів, покриттів для загоєння ран та тканино-інженерних конструкцій [5, 6].

Електроформування – технологія для отримання ультратонких волокон шляхом витягування полімерного розчину або розплаву під дією високовольтного електричного поля. Завдяки високій питомій площі поверхні та можливості контролю структури волокон ця технологія також успішно використовується для покращення розчинності, створення систем пролонгованого вивільнення препаратів, покриттів для загоєння ран та біоміметичних матриць для регенеративної медицини [1, 3].

Незважаючи на значний прогрес у розвитку зазначених технологій, вибір оптимального методу отримання мікро- та наноструктурованих систем для фармацевтичного застосування залишається актуальним завданням, оскільки кінцеві властивості продукту визначаються поєднанням характеристик вихідних матеріалів та параметрів технологічного процесу. Тому проведення порівняльного аналізу сучасних методів розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування є важливим для обґрунтування їх ефективного застосування у фармацевтичній розробці.

Розпилювальне сушіння. Розпилювальне сушіння є однією з найстаріших та найпоширеніших технологій отримання сухих порошкоподібних матеріалів із розчинів, суспензій або емульсій. Перші промислові установки для розпилювального сушіння були розроблені наприкінці XIX століття для виробництва молочних порошоків, однак упродовж останніх десятиліть метод набув широкого застосування у фармацевтичній промисловості завдяки можливості отримання частинок із контрольованими фізико-хімічними властивостями [2].

Принцип роботи методу полягає у перетворенні рідкої системи на дрібнодисперсний аерозоль з подальшим швидким висушуванням крапель у потоці нагрітого газу. Типова розпилювальна сушарка складається з резервуара для вихідного розчину, системи подачі рідини, форсунки або роторного розпилювача, сушильної камери, системи подачі гарячого повітря, циклону для збору частинок та приймального контейнера для готового продукту [2].

Під час процесу рідкий розчин розпорошується через форсунку з утворенням дрібних крапель, які контактують із гарячим сушильним агентом. Внаслідок швидкого випаровування розчинника відбувається формування сухих частинок із заданими морфологічними характеристиками. Залежно від умов процесу можуть утворюватися частинки зі складною внутрішньою структурою різної форми та розмірів.

Особливе значення для фармацевтичної технології має можливість формування аморфних ТДС. Завдяки надзвичайно швидкому видаленню розчинника процес часто перешкоджає кристалізації активної речовини, що сприяє підвищенню розчинності та біодоступності лікарських препаратів.

Однією з головних переваг розпилювального сушіння є висока продуктивність процесу. Технологія дозволяє безперервно виробляти значні обсяги ТДС із високою відтворюваністю характеристик продукту. Важливою перевагою методу є також легке масштабування від лабораторних установок до промислового виробництва. Можливість перенесення параметрів процесу між різними масштабами значно спрощує впровадження нових фармацевтичних розробок у виробництво.

Розпилювальне сушіння широко використовується у фармацевтичній промисловості для виробництва інгаляційних порошоків, мікрокапсул, вакцин, біофармацевтичних препаратів та інших лікарських форм, що підтверджує його високу технологічність і відповідність вимогам сучасного виробництва. Окремою перевагою є можливість отримання аморфних ТДС

активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) у полімерних матрицях. Такі системи дозволяють суттєво підвищити швидкість розчинення та біодоступність малорозчинних лікарських речовин [2].

Незважаючи на численні переваги, розпилювальне сушіння має певні обмеження. Одним із них є температурний вплив на матеріал, оскільки високі температури сушильного агенту можуть призводити до часткової деградації деяких АФІ та допоміжних речовин [2, 4].

У зв'язку з цим існують обмеження щодо використання даного методу для термолабільних сполук, зокрема білків, пептидів, вакцин та інших біологічних препаратів. Для таких систем необхідний ретельний підбір параметрів процесу та стабілізуючих допоміжних речовин [2].

Ще одним обмеженням технології є те, що розпилювальне сушіння забезпечує отримання переважно мікро- та наночастинок, а не безперервних волокон. Тому для створення високопористих волокнистих структур частіше застосовують електроформування або відцентрове формування волокон [1, 5, 6].

Сучасні тенденції розвитку розпилювального сушіння. Упродовж останніх років технологія розпилювального сушіння активно розвивається у напрямку отримання нанорозмірних частинок, стабілізації біологічних препаратів, створення сухих форм вакцин, інгаляційних лікарських систем та впровадження інструментів штучного інтелекту для керування технологічними процесами. Ці тенденції пов'язані зі зростанням вимог до ефективності, стабільності та персоналізації фармацевтичних препаратів [7, 8].

Одним із найперспективніших напрямів є використання технології нанорозпилювального сушіння, яка дозволяє отримувати частинки субмікронного та нанометрового діапазону з вузьким розподілом за розміром. На відміну від традиційного розпилювального сушіння, нанорозпилювальне сушіння використовує мембранні розпилювачі та електростатичні колектори, що забезпечує високу ефективність уловлювання дрібнодисперсних частинок і можливість роботи з обмеженими кількостями високовартісних АФІ [8].

Завдяки такому підходу вдається покращити розчинність малорозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів, підвищити біодоступність препаратів та створювати нові системи доставки лікарських речовин на основі наночастинок [7, 9].

Сучасні дослідження дедалі частіше спрямовуються на використання розпилювального сушіння для інкапсуляції біологічних молекул, таких як білки, пептиди, моноклональні антитіла, ферменти та нуклеїнові кислоти. Формування захисної полімерної матриці навколо активної речовини дозволяє зменшити її деградацію під час зберігання та транспортування. Особливу увагу приділяють підбору стабілізуючих допоміжних речовин (сахароза, манітол, амінокислоти тощо), які захищають структуру біологічних молекул від денатурації під час сушіння [9]. Це відкриває перспективи для створення термостабільних біофармацевтичних препаратів із тривалим терміном придатності [7].

Одним із найбільш успішних напрямків комерційного використання розпилювального сушіння є створення сухих порошків для інгаляційного введення. Метод дозволяє отримувати частинки з діаметром 1–5 мкм, що забезпечує ефективне проникнення препарату до нижніх відділів дихальних шляхів [4, 8].

Сучасні дослідження зосереджені на створенні інгаляційних форм на основі наноліпідних систем, біофармацевтичних препаратів та вакцин, а також на для підвищення ефективності доставки лікарських засобів системної дії у легені [4].

Новітнім напрямом розвитку технології є застосування штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування характеристик ТДС, оптимізації параметрів сушіння та масштабування виробництва. Традиційні підходи до моделювання процесу часто потребують значних обчислювальних ресурсів, тому все більшої популярності набувають

гібридні моделі, які поєднують методи комп'ютерної гідродинаміки із алгоритмами машинного навчання [8].

Сучасні дослідження також розглядають використання систем PAT (Process Analytical Technology) та методи інтерпретації рішень штучного інтелекту (Explainable AI) для контролю критичних параметрів процесу в режимі реального часу. Такі підходи можуть суттєво скоротити витрати на розробку лікарських форм та підвищити відтворюваність виробництва [7].

Відцентрове формування волокон. Відцентрове формування волокон є сучасною технологією отримання мікро- та нановолокон, у якій для витягування полімерних струменів використовується відцентрова сила, що виникає під час швидкого обертання головки з полімерним розчином або розплавом.

На відміну від електроформування, де основною рушійною силою є електростатичне поле, у відцентровому формуванні утворення волокон відбувається внаслідок перевищення відцентрової сили над силами поверхневого натягу. Коли швидкість обертання досягає критичного значення, полімерний розчин або розплав викидається через отвори ротора у вигляді тонких струменів, які під час руху розтягуються та тверднуть внаслідок випаровування розчинника або охолодження розплаву [5, 6].

Залежно від типу вихідного матеріалу розрізняють [6, 10]:

- формування волокон із полімерного розчину;
- формування волокон безпосередньо з полімерного розплаву.

Технологія дозволяє отримувати волокна діаметром від кількох сотень нанометрів до декількох мікрометрів. Морфологія та розміри волокон визначаються швидкістю обертання, в'язкістю системи, концентрацією полімеру, розміром сопел та умовами навколишнього середовища.

Однією з головних переваг відцентрового формування є висока продуктивність процесу, що робить технологію перспективною для промислового виробництва волокнистих матеріалів [5, 6].

Істотною перевагою є також відсутність необхідності використання високої напруги. Це зменшує енергоспоживання, підвищує безпеку процесу та дозволяє працювати з матеріалами, які мають недостатню електропровідність для електроформування [5].

Попри численні переваги, відцентрове формування має певні обмеження. Одним із головних недоліків є менш точний контроль за діаметром волокон, ніж при електроформуванні. Розмір волокон значною мірою залежить від реологічних властивостей полімерної системи та швидкості обертання ротора, що ускладнює отримання матеріалів із вузьким розподілом за діаметром.

Ще одним недоліком є складність отримання ультратонких нановолокон діаметром менш ніж 100 нм. У більшості випадків відцентрове формування забезпечує отримання волокон мікронного або субмікронного діапазону, тоді як для створення надтонких нановолокон перевага часто залишається за електроформуванням. Також під час процесу можливе утворення дефектів у вигляді крапель або агрегатів, особливо при недостатній концентрації полімеру чи неоптимальних параметрах обертання [5, 6].

Сучасні тенденції у технології відцентрового формування волокон. Одним із найбільш активно досліджуваних напрямів є відцентрове формування волокон із розплаву у якому волокна формуються без використання органічних розчинників. Такий підхід є екологічно безпечнішим, спрощує очищення готового продукту та полегшує масштабування виробництва. Особливий інтерес викликає отримання волокон із полілактиду (PLA), полікапролактону (PCL), полігліколіду (PGA) та інших термопластичних полімерів [10, 11].

Використання розплавів також дозволяє зменшити залишковий вміст розчинників у готовому матеріалі, що є важливим для фармацевтичного і медичного застосування [10].

Значна кількість сучасних досліджень присвячена використанню біорозкладних полімерів, таких як PLA, PCL, PGA та їх кополімерів. Такі матеріали поєднують достатні механічні властивості з біосумісністю та здатністю поступово деградувати в організмі без утворення токсичних продуктів. Біорозкладні волокна розглядаються як перспективна основа для систем доставки лікарських засобів, тканинної інженерії та регенеративної медицини [5, 6, 12].

Одним із найбільш перспективних напрямів є розробка систем для захисту та регенерації пошкоджених тканин на основі відцентрово сформованих волокон. Завдяки великій питомій площі поверхні та здатності інкорпорувати антимікробні й протизапальні агенти такі матеріали забезпечують оптимальні умови для загоєння ран [5, 12].

Останніми роками значно розширюється застосування відцентрово сформованих волокон для створення фільтраційних мембран. Такі матеріали характеризуються високою проникністю, розвиненою пористою структурою та можливістю регулювання розміру пор. Вони використовуються для очищення води, повітря, затримування мікроорганізмів, виготовлення антимікробних фільтрів та захисних матеріалів. Висока продуктивність процесу робить технологію особливо привабливою для масштабного виробництва фільтраційних систем [5, 6].

Окрему увагу приділяють розробці волокон типу «ядро – оболонка», багатошарових волокнистих систем та гібридних матеріалів, отриманих шляхом комбінування відцентрового формування з електроформуванням [5].

Особливий інтерес становлять багатокомпонентні волокнисті структури з натуральними полімерними компонентами, срібними наночастинками та біоактивними сполуками, які демонструють виражені антибактеріальні властивості та сприяють регенерації тканин [12].

Вагомий внесок у розвиток технології відцентрового формування волокон у фармацевтичній галузі зроблено українськими дослідниками. Проведені роботи продемонстрували можливість отримання високорозчинних ТДС на основі полімерних носіїв і малорозчинних АФІ, зокрема німесулідів та гесперидину. Встановлено, що формування волокон дозволяє зменшити кристалічність субстанцій, підвищити швидкість розчинення та забезпечити покращені біофармацевтичні характеристики. Це відкриває широкі перспективи використання цієї технології для створення лікарських препаратів нового покоління [13, 14].

Електроформування. Електроформування є одним із найбільш перспективних методів отримання мікро- та нановолокон. Метод базується на використанні електростатичних сил для витягування тонких полімерних струменів із розчину або розплаву з подальшим формуванням безперервних волокон діаметром від десятків нанометрів до кількох мікрометрів [1, 3, 15].

Ключовим етапом процесу є утворення конуса Тейлора. Під дією високої напруги заряд накопичується на поверхні полімерної краплі. Коли електростатичні сили перевищують сили поверхневого натягу, крапля набуває конічної форми, а з вершини конуса викидається тонкий заряджений струмінь полімеру [3, 15].

У процесі руху до колектору струмінь зазнає численних відхилень траєкторії струменя, що супроводжуються його інтенсивним розтягуванням та зменшенням діаметра. Одночасно відбувається випаровування розчинника або охолодження розплаву, внаслідок чого формуються тверді волокна, які осідають на колекторі у вигляді нетканого волокнистого мату [1, 3].

Основними елементами установки є джерело високої напруги, капіляр або голка, система подачі розчину та колектор для збору волокон [1].

Головною перевагою електроформування є можливість отримання волокон нанометрового діапазону, що значно перевищує можливості більшості інших технологій формування волокон [1, 3].

ТДС отримані даним методом характеризуються надзвичайно великою питомою поверхнею, що сприяє ефективній адсорбції, швидкому розчиненню лікарських речовин та підвищенню швидкості масообміну [1, 15].

Важливою перевагою є можливість контролю структури волокон. Шляхом зміни складу розчину та параметрів процесу можна регулювати діаметр волокон, пористість, орієнтацію, морфологію поверхні та швидкість вивільнення лікарських речовин [1, 17].

Отримані матеріали також характеризуються високою пористістю, що забезпечує хороший транспорт кисню, поживних речовин та біологічних рідин. Це особливо важливо для тканинної інженерії, ранових покриттів та систем доставки лікарських засобів [1, 15].

Незважаючи на численні переваги, електроформування має низку обмежень.

Найбільш суттєвим недоліком є невисока продуктивність процесу. У класичних одно-голкових системах швидкість утворення волокон є відносно низькою, що ускладнює промислове застосування технології [15, 17].

Більшість процесів електроформування потребують використання органічних розчинників, які можуть бути токсичними, легкозаймистими та вимагати додаткового контролю залишкових кількостей у готовій продукції [1, 15].

Ще одним обмеженням залишається складність масштабування виробництва. Перехід від лабораторних до промислових установок потребує забезпечення стабільності одночасного формування великої кількості струменів без погіршення якості волокон [1, 17].

Сучасні досягнення електроформування. Протягом останніх років розвиток електроформування був спрямований на підвищення продуктивності, створення складних багатофункціональних волокнистих структур, мінімізацію використання органічних розчинників та інтеграцію технології з цифровими методами керування процесами [1, 3, 17].

На відміну від класичного електроформування, де для екструзії полімерного розчину застосовується голка, безголковий метод виключає використання сопел. Роль дозатора в ньому виконує рухомий диск, струна або конусна поверхня, які вкриваються тонкою плівкою рідкого полімеру. Завдяки впливу потужного електричного поля на цій поверхні генерується множина паралельних струменів, що суттєво підвищує продуктивність синтезу нановолокон. [17].

Саме безголковий метод сьогодні розглядається як один із ключових шляхів промислового впровадження електроформованих матеріалів [1, 17].

Значну увагу також привертає коаксіальне електроформування, у якому використовуються концентрично розташовані капіляри для одночасної подачі двох різних рідин [17, 18].

У результаті формуються волокна типу «ядро – оболонка», що дозволяє:

- захищати нестабільні активні речовини;
- контролювати швидкість вивільнення препаратів;
- забезпечувати багатостадійне вивільнення лікарських засобів;
- інкапсулювати біологічні молекули та вакцини.

Подальшим розвитком коаксіальної технології стало багатоструменеве електроформування, у якому використовуються три та більше рідких потоків [3, 17].

Такі системи дозволяють отримувати складні багатошарові волокна та створювати сучасні системи доставки лікарських засобів з програмованим профілем вивільнення. Особливий інтерес вони викликають у розробці комбінованих препаратів, де необхідне послідовне або вибіркове вивільнення кількох активних компонентів [3].

Важливим сучасним напрямом є електроформування волокон із розплаву, де замість полімерних розчинів використовуються полімерні розплави [1, 3].

Основною перевагою підходу є повна або майже повна відмова від органічних розчинників, що підвищує безпечність процесу та спрощує регуляторне затвердження медичних і фармацевтичних продуктів. Крім того, метод дозволяє отримувати високочисті біомедичні матеріали для імплантатів та тканинної інженерії [1, 15].

Окремий напрям розвитку пов'язаний із формуванням тривимірних структур – 3D-електроформування. Традиційне електроформування зазвичай забезпечує формування відносно тонких ТДС із невеликою кількістю вільного простору між волокнами, що може обмежувати клітинну інфільтрацію.

Комбінування електроформування з 3D-друком, формуванням пористої структури з керованим укладанням волокон дозволяє створювати об'ємні матриці, які імітують позаклітинний матрикс тканин. Такі структури активно досліджуються для регенерації кісткової, хрящової, судинної та нервової тканин [1, 15].

Найновішим напрямом є використання штучного інтелекту та машинного навчання для розробки та керування процесом електроформування [15].

Алгоритми машинного навчання застосовуються для:

- прогнозування фізико-хімічних властивостей отриманих волоконних матеріалів;
- встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу та характеристиками кінцевого продукту;
- вибору напруги, швидкості подачі та відстані до колектору;
- автоматичного виявлення дефектів волокон;
- мінімізації кількості експериментів шляхом віртуальної оптимізації параметрів процесу;
- масштабування виробництва, тобто забезпечення відтворюваності характеристик продукції під час переходу від лабораторного до промислового виробництва.

Поєднання електроформування із системами реального часу та ШІ-моделями розглядається як один із найбільш перспективних напрямів розвитку персоналізованих медичних і фармацевтичних технологій наступного покоління [18].

Порівняння технологій отримання мікро- та наноструктурованих систем для фармацевтичного застосування [1, 3, 6, 7].

Таблиця 1

Порівняльна характеристика розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування

Характеристика	Розпилювальне сушіння	Відцентрове формування волокон	Електроформування
Основний принцип	Висушування розпиленних крапель	Формування волокон під дією відцентрової сили	Формування волокон під дією електростатичних сил
Кінцевий продукт	Мікро- та наночастинки	Мікро- та нановолокна	Мікро- та нановолокна
Типовий розмір	1 - 100 мкм	0,2 - 10 мкм	20 - 1000 нм
Питома поверхня	Середня	Висока	Дуже висока
Пористість	Низька–середня	Висока	Дуже висока
Контроль морфології	Середній	Середній	Високий
Продуктивність	Висока	Дуже висока	Низька–середня
Масштабування	Промислово реалізоване	Добрі перспективи	Обмежене
Необхідність високої напруги	Ні	Ні	Так
Використання розчинників	Можливе	Можливе	Часто необхідне
Отримання ТДС	Відмінне	Обмежене	Добре

Закінчення табл. 1

Характеристика	Розпилювальне сушіння	Відцентрове формування волокон	Електроформування
Отримання ультратонких нановолокон	Неможливе	Обмежене	Найкраще
Основні переваги	Продуктивність, масштабування	Висока продуктивність, низька вартість	Контроль структури, нанорозмірність
Основні недоліки	Температурний вплив	Менший контроль діаметра	Низька продуктивність
Фармацевтичні застосування	Аморфні дисперсії, вакцини, інгаляційні порошки	Покриття для загоювання ран, доставка ліків	Контрольоване вивільнення, тканинна інженерія

Аналіз та порівняння технологій. Розпилювальне сушіння є найбільш промислово освоєною технологією серед розглянутих методів. Головними перевагами цього підходу є висока продуктивність, добра відтворюваність процесу, можливість масштабування та широке використання у виробництві лікарських засобів. Особливе значення метод має для отримання аморфних ТДС, що дозволяють покращувати розчинність і біодоступність малорозчинних АФІ. Водночас технологія переважно забезпечує формування мікрочастинок, а не волокнистих структур, що обмежує можливість створення високопористих матеріалів із надзвичайно великою питомою поверхнею [2, 6].

Відцентрове формування волокон є перспективним методом, що дозволяє одержувати значні кількості мікро- та нановолокон і характеризується кращими перспективами масштабування для промислового виробництва. Крім того, нижча вартість обладнання та простота конструкції підвищують економічну привабливість технології. Однак контроль діаметра волокон та їх морфології залишається менш точним порівняно з електроформуванням, а отримання ультратонких нановолокон є складнішим завданням [5, 6].

Електроформування забезпечує найвищий рівень контролю над структурою ТДС. Метод дозволяє отримувати волокна нанометрового діапазону з дуже великою питомою поверхнею та високою пористістю. Сучасні модифікації технології, значно розширюють можливості створення складних систем доставки лікарських речовин і біомедичних конструкцій.

Разом із тим електроформування все ще має обмеження, пов'язані з відносно низькою продуктивністю, використанням органічних розчинників та складністю масштабування процесу до промислового рівня. Але серед сучасних технологій отримання мікро- та наноструктурованих матеріалів саме електроформування демонструє найбільш динамічний розвиток та привертає значну увагу наукової спільноти. Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про постійне зростання кількості публікацій, присвячених електроформованим ТДС, що пов'язано з широкими можливостями модифікації даного методу [1, 3, 15].

Дослідження показало, що електроформовані нановолокна на основі полікапролактону та желатину з дексаметазоном забезпечують контрольоване вивільнення препарату та ефективну протизапальну дію. Отримані результати підкреслюють важливість оптимізації розподілу лікарської речовини у волокнистій структурі та демонструють потенціал електроформованих ТДС для перев'язувальних засобів в імуномодельюючій терапії ран [14].

Популярність електроформування у фармацевтичній технології обумовлена його здатністю поєднувати процес формування носія лікарської речовини з одночасною інкапсуляцією активних фармацевтичних інгредієнтів. На відміну від багатьох традиційних

методів, електроформування дозволяє отримувати аморфні ТДС та системи з розвиненою пористою структурою, що сприяють підвищенню швидкості розчинення і біодоступності лікарських препаратів [1, 3].

Так, для гесперидину [14] було показано, що включення АФІ до електроформованих нановолокон на основі полівінілпіролідону та гідроксипропіл- β -циклодекстрину забезпечує суттєве покращення його фармацевтичних властивостей, зокрема більш ніж восьмиразове підвищення розчинності та понад дев'ятикратне збільшення проникності через модель біологічної мембрани. Такі результати підтверджують високу ефективність електроформування для створення ТДС малорозчинних лікарських речовин.

Особливого значення технологія набуває в умовах розвитку персоналізованої медицини. Сучасні тенденції фармацевтичної розробки спрямовані на створення індивідуалізованих лікарських форм із можливістю точного підбору дози та профілю вивільнення активної речовини. Завдяки гнучкості процесу електроформування можна легко змінювати склад волокон, їхню морфологію, діаметр та архітектуру, адаптуючи систему доставки до конкретних терапевтичних потреб пацієнта. Перспективним напрямом є також використання електроформування для доставки біологічних препаратів. Дана перевага набуває особливої актуальності у зв'язку зі зростанням частки біотехнологічних препаратів на світовому фармацевтичному ринку [3, 15].

Значну увагу привертає розробка мукоадгезивних систем доставки лікарських речовин на основі електроформованих ТДС. Висока пористість та розвинена поверхня таких матеріалів забезпечує ефективний контакт зі слизовими оболонками та пролонгований час утримання препарату в місці введення. Подібні системи можуть використовуватися для букального, назального та офтальмологічного введення лікарських засобів [1, 3].

Одним із найбільш активно досліджуваних напрямів останніх років є створення ородисперсних ліків та ороплівок. Електроформовані волокнисті плівки швидко змочуються та розчиняються в ротовій порожнині, забезпечуючи швидке вивільнення активної речовини без необхідності ковтання традиційних таблеток. Такі системи особливо перспективні для дітей, літніх пацієнтів та осіб із порушеннями ковтання [3].

Широкого поширення набули електроформовані ТДС у складі покриттів для загоювання ран. Завдяки структурній подібності до позаклітинного матриксу, високій проникності для газів та здатності інкорпоровати антибактеріальні, протизапальні та регенеративні агенти такі волокнисті мати створюють сприятливі умови для загоєння тканин. Крім того, вони забезпечують захист рани від зовнішнього забруднення та підтримують оптимальне вологе середовище [1, 15].

Електроформування розглядається як перспективна технологія для створення локальних систем доставки імунотерапевтичних агентів у лікуванні раку голови та шиї. Завдяки високій площі поверхні та можливості інкапсуляції біологічно активних молекул у електроформованих ТДС забезпечується контрольоване та таргетоване вивільнення препаратів без системної токсичності. Такий підхід відкриває можливості для персоналізованої медицини, зокрема у випадках позитивних хірургічних країв або складних анатомічних локалізацій пухлин. Інтеграція електроформованих систем з біомаркерами та сучасними методами ендоскопічної доставки може стати основою нової парадигми імуномодельючої терапії, спрямованої на зниження ризику рецидиву та покращення якості життя пацієнтів [19].

Дослідження підтвердило, що трансдермальна гелева система з німесулідом у формі резервуарного пластиру може забезпечити ефективне та безпечне контрольоване вивільнення препарату через шкіру. Оптимальна формула з 40% етанолу та 20% пропіленгліколю продемонструвала найвищі показники проникнення, швидкий початок дії та відсутність подразнювального ефекту. Отримані результати свідчать про потенціал такої системи як

альтернативи пероральним формам німесулід, що дозволяє знизити ризик побічних ефектів з боку шлунково-кишкового тракту та підвищити терапевтичну ефективність [20].

Таким чином, електроформування вже давно вийшло за межі класичної технології одержання нановолокон і перетворилося на універсальну платформу для створення інноваційних фармацевтичних та біомедичних систем. Постійне вдосконалення процесу, свідчить про подальше зростання ролі електроформування у створенні лікарських форм майбутнього [1, 3, 15–18].

Завдяки поєднанню можливості формування нанорозмірних волокон, високої питомої площі поверхні та широких можливостей інкапсуляції активних речовин електроформування сьогодні розглядається як одна з найбільш перспективних платформ для створення фармацевтичних систем нового покоління, здатних забезпечувати ефективну, безпечну та персоналізовану доставку лікарських засобів.

Висновки. У роботі проведено аналіз сучасних технологій отримання мікро- та наноструктурованих систем для фармацевтичного застосування, зокрема розпилювального сушіння, відцентрового формування волокон та електроформування. Встановлено, що кожна з розглянутих технологій має власні переваги, обмеження, загальні та специфічні сфери застосування, що визначають доцільність їх використання залежно від вимог до кінцевого продукту.

Аналіз сучасних публікацій свідчить про зростання наукового інтересу до технології електроформування та можливостей застосування методів штучного інтелекту для оптимізації процесів отримання мікро- та наноструктурованих систем. Це сприяє вдосконаленню технологічних підходів і розширенню потенційних сфер використання зазначених технологій.

Таким чином, усі три розглянуті технології є ефективними інструментами для створення сучасних фармацевтичних систем і мають власні переваги та обмеження. Водночас електроформування привертає значну увагу дослідників завдяки можливості отримання наноструктурованих матеріалів із контрольованими властивостями та широким потенціалом застосування в системах доставки лікарських речовин. Подальший розвиток даної технології поряд з удосконаленням методів розпилювального сушіння та відцентрового формування волокон сприятиме створенню більш ефективних і безпечних лікарських форм відповідно до сучасних потреб фармацевтичної науки та медицини.

References

1. Wang Q., Ji P., Bu T. et al. (2025). Recent Progress in the Application of Electrospinning Technology in the Biomedical Field. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(7), 266. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb16070266>.
2. Ordoubadi, M., Wang, H., & Vehring, R. (2023). Mechanistic Formulation Design of Spray-Dried Powders. *KONA Powder and Particle Journal*, 40, 149–171. DOI: <https://doi.org/10.14356/kona.2023012>.
3. Lian, S., Lamprou, D., & Zhao, M. (2024). Electrospinning Technologies for the Delivery of Biopharmaceuticals: Current Status and Future Trends. *International Journal of Pharmaceutics*, 651, 123641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123641>.
4. Abu Elella, M.H., Al Khatib, A. O., & Al Obaidi, H. (2024). Spray-Dried Nanolipid Powders for Pulmonary Drug Delivery: A Comprehensive Mini

Література

1. Wang Q., Ji P., Bu T. et al. Recent Progress in the Application of Electrospinning Technology in the Biomedical Field. *Journal of Functional Biomaterials*. 2025. Vol. 16, No. 7. Article 266. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb16070266>.
2. Ordoubadi M., Wang H., Vehring R. Mechanistic Formulation Design of Spray-Dried Powders. *KONA Powder and Particle Journal*. 2023. Vol. 40. P. 149–171. DOI: <https://doi.org/10.14356/kona.2023012>.
3. Lian S., Lamprou D., Zhao M. Electrospinning Technologies for the Delivery of Biopharmaceuticals: Current Status and Future Trends. *International Journal of Pharmaceutics*. 2024. Vol. 651. Article 123641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123641>.
4. Abu Elella M. H., Al Khatib A. O., Al-Obaidi H. Spray-Dried Nanolipid Powders for Pulmonary Drug Delivery: A Comprehensive Mini Review.

- Review. *Pharmaceutics*, 16(5), 680. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16050680>.
5. Ahmed, J., Gultekinoglu, M., & Edirisinghe, M. (2024). Recent Developments in the Use of Centrifugal Spinning and Pressurized Gyration for Biomedical Applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 16(1), e1916. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1916>.
6. Marjuban, S. M. H., Rahman, M., Duza, S. S. et al. (2023). Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering. *Polymers*, 15(5), 1253. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15051253>.
7. Wahab, W., Alshamsi, R., Alharsousi, B. et al. (2025). Recent Developments in Pharmaceutical Spray Drying: Modeling, Process Optimization, and Emerging Trends with Machine Learning. *Pharmaceutics*, 17(12), 1605. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17121605>.
8. Jadhav, K., Kole, E., Singh, R. et al. (2024). A Critical Review on Developments in Drying Technologies for Enhanced Stability and Bioavailability of Pharmaceuticals. *Drying Technology*, 42(9), 1415–1441. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2357181>.
9. Pudžiuvėlytė, L., Petrauskaitė, E., Stabrauskienė, J., & Bernatoniene, J. (2025). Spray-Drying Microencapsulation of Natural Bioactives: Advances in Sustainable Wall Materials. *Pharmaceutics*, 18(7), 963. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph18070963>.
10. Naeimirad, M., Krins, B., & Gruter, G.-J. M. (2023). A Review on Melt-Spun Biodegradable Fibers. *Sustainability*, 15(19), 14474. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914474>.
11. Naeimirad, M., Krins, B., McLuskie, A. et al. (2025). Physical characterization and biodegradation of fibers produced by melt-spinning of aliphatic polyesters. *Sci Rep*, 15, 24543. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04258-z>.
12. Tran, T. P. A., Luong, A. H., & Lin, W. C. (2024). Characterizations of Centrifugal Electrospun Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate/Tamanu Oil/Silver Nanoparticles Wound Dressing. *IEEE transactions on nanobioscience*, 23(2), 368–377. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNB.2024.3371224>.
13. Lisovyi, V. M., & Bessarabov, V. I. (2024). Doslidzhennia tekhnologichnykh aspektiv vyhotovlennia polimernoho kompozytsiinoho materialu metodom vidtsentrovoho formuvannia volokon [Study of technological aspects of manufacture of polymer composite material by centrifugal fiber forming method]. *Technology Audit and Production Reserves*, 2024. Т. 4, № 3(78). С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310805>.
- Pharmaceutics*. 2024. Vol. 16, No. 5. Article 680. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16050680>.
5. Ahmed J., Gultekinoglu M., Edirisinghe M. Recent Developments in the Use of Centrifugal Spinning and Pressurized Gyration for Biomedical Applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2024. Vol. 16, No. 1. Article e1916. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1916>.
6. Marjuban S. M. H., Rahman M., Duza S. S. et al. Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 5. Article 1253. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15051253>.
7. Wahab W., Alshamsi R., Alharsousi B. et al. Recent Developments in Pharmaceutical Spray Drying: Modeling, Process Optimization, and Emerging Trends with Machine Learning. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17, No. 12. Article 1605. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17121605>.
8. Jadhav K., Kole E., Singh R. et al. A Critical Review on Developments in Drying Technologies for Enhanced Stability and Bioavailability of Pharmaceuticals. *Drying Technology*. 2024. Vol. 42, No. 9. P. 1415–1441. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2357181>.
9. Pudžiuvėlytė L., Petrauskaitė E., Stabrauskienė J., Bernatoniene J. Spray-Drying Microencapsulation of Natural Bioactives: Advances in Sustainable Wall Materials. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 18, No. 7. Article 963. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph18070963>.
10. Naeimirad M., Krins B., Gruter G.-J. M. A Review on Melt-Spun Biodegradable Fibers. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 19. Article 14474. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914474>.
11. Naeimirad M., Krins B., McLuskie A. et al. Physical Characterization and Biodegradation of Fibers Produced by Melt-Spinning of Aliphatic Polyesters. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 24543. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04258-z>.
12. Tran T. P. A., Luong A. H., Lin W. C. Characterizations of Centrifugal Electrospun Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate/Tamanu Oil/Silver Nanoparticles Wound Dressing. *IEEE Transactions on Nanobioscience*. 2024. Vol. 23, No. 2. P. 368–377. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNB.2024.3371224>.
13. Лісовий В. М., Бессарабов В. І. Дослідження технологічних аспектів виготовлення полімерного композиційного матеріалу методом відцентрового формування волокон. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Т. 4, № 3(78). С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310805>.

and Production Reserves, 4(3(78)), 22–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310805> [in Ukrainian].

14. Bessarabov, V., Lisovyi, V., Lyzhniuk, V., Kostiuk, V., Smishko, R., Yaremenko, V., Goy, A., Derkach, T., Kuzmina, G., & Gureyeva, S. (2025). Development and characterisation of polymeric solid dispersed systems of hesperidin, obtained by centrifugal fibre formation. *Heliyon*, 11(4), e42702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42702>.

15. Teng, Y., Song, L., Shi, J., Lv, Q., Hou, S., & Ramakrishna, S. (2025). Advancing electrospinning towards the future of biomaterials in biomedical engineering. *Regenerative Biomaterials*, 12, rbaf034. DOI: <https://doi.org/10.1093/rb/rbaf034>.

16. Hossain, M. R., Alam, M. M., Esposito Corcione, C., Striani, R., & Alam, M. S. (2026). Electrospun Polycaprolactone/Gelatin Blended Nanofibre Textiles with Controlled Dexamethasone Release for Anti-Inflammatory Wound Dressings. *Polymers*, 18(12), 1495. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym18121495>.

17. Gupta, I., Rumde, P., Vannam, S. S., Patil, T. M., & Pongade, V. V. (2024). A Review On Electrospinning Techniques And Its Applications. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(10). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14000605>.

18. Alli, Y.A., Bamisaye, A., Ige, A.S. et al. (2026). Coaxial electrospinning as a promising technique for fabricating advanced materials for energy storage applications. *Discov Appl Sci*, 8, 88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07641-7>.

19. O'Meara, C. H., Nguyen, T. V., Jafri, Z., Boyer, M., Shonka, D. C., Jr., & Khachigian, L. M. (2024). Personalised Medicine and the Potential Role of Electrospinning for Targeted Immunotherapeutics in Head and Neck Cancer. *Nanomaterials*, 14(1), 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14010006>.

20. Hassam, H., Shoaib, M. H., Yousuf, R. I. et al. (2022). Formulation development and evaluation of nimesulide transdermal gel patch system. *Polym. Bull.*, 79, 5121–5138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03764-0>.

14. Bessarabov V., Lisovyi V., Lyzhniuk V., Kostiuk V., Smishko R., Yaremenko V., Goy A., Derkach T., Kuzmina G., Gureyeva S. Development and characterisation of polymeric solid dispersed systems of hesperidin, obtained by centrifugal fibre formation. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, Issue 4. Article e42702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42702>.

15. Teng Y., Song L., Shi J., Lv Q., Hou S., Ramakrishna S. Advancing Electrospinning Towards the Future of Biomaterials in Biomedical Engineering. *Regenerative Biomaterials*. 2025. Vol. 12. Article rbaf034. DOI: <https://doi.org/10.1093/rb/rbaf034>.

16. Hossain M. R., Alam M. M., Esposito Corcione C., Striani R., Alam M. S. Electrospun Polycaprolactone/Gelatin Blended Nanofibre Textiles with Controlled Dexamethasone Release for Anti-Inflammatory Wound Dressings. *Polymers*. 2026. Vol. 18, No. 12. Article 1495. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym18121495>.

17. Gupta I., Rumde P., Vannam S. S., Patil T. M., Pongade V. V. A Review on Electrospinning Techniques and Its Applications. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2024. Vol. 2, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14000605>.

18. Alli Y. A., Bamisaye A., Ige A. S. et al. Coaxial Electrospinning as a Promising Technique for Fabricating Advanced Materials for Energy Storage Applications. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8. Article 88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07641-7>.

19. O'Meara C. H., Nguyen T. V., Jafri Z., Boyer M., Shonka D. C. Jr., Khachigian L. M. Personalised Medicine and the Potential Role of Electrospinning for Targeted Immunotherapeutics in Head and Neck Cancer. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, No. 1. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14010006>.

20. Hassam H., Shoaib M. H., Yousuf R. I. et al. Formulation Development and Evaluation of Nimesulide Transdermal Gel Patch System. *Polymer Bulletin*. 2022. Vol. 79. P. 5121–5138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03764-0>.

ISHCHENKO OLENA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine;
Leading Researcher, Department of Physical-Organic
Chemistry of Functional Substances and Materials,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic
Chemistry and Coal Chemistry
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>
Scopus Author ID: 57200013816
E-mail: ishhenko.ov@knuutd.edu.ua

YEGANYAN MIKAEL

Postgraduate Student at the
Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-1246-6594>
E-mail: yeganyan.mv@knuutd.edu.ua

Olena ISHCHENKO^{1,2}, Mikael YEGANYAN¹

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry
and Coal Chemistry NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SPRAY DRYING, CENTRIFUGAL FIBRE FORMATION AND ELECTROSPINNING IN MODERN PHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

Purpose. The aim of this study was to review and compare modern technologies used for the production of micro- and nanostructured systems for pharmaceutical applications, including spray drying, centrifugal spinning, and electrospinning. Particular attention was paid to their ability to modify the physicochemical properties of active pharmaceutical ingredients, improve bioavailability, and support the development of modern drug delivery systems.

Methodology. The study was based on the analysis, systematization, and comparison of published scientific literature. Recent studies related to the production of micro- and nanostructured materials were reviewed, with a focus on technological principles, material characteristics, and the influence of process parameters on the properties of the final products. The technologies were compared in terms of productivity, scalability, morphology control, impact on active ingredient stability, and potential pharmaceutical applications.

Findings. The literature review showed that spray drying is a well-established and widely used technology for the preparation of amorphous solid dispersions that can improve the solubility and bioavailability of poorly soluble active pharmaceutical ingredients. Centrifugal spinning is characterized by high productivity, does not require high voltage, and has strong potential for industrial scale-up. Electrospinning allows the production of ultrafine fibers with a large specific surface area and precise control of material structure, making it suitable for advanced drug delivery systems with controlled and targeted release. It was found that the choice of technology depends on the properties of the active substance, the requirements of the final dosage form, and the manufacturing process.

Originality. The study provides a comprehensive comparison of three modern technologies for the production of micro- and nanostructured pharmaceutical systems. Their technological features, material characteristics, advantages, limitations, and future development prospects are summarized and discussed from the perspective of pharmaceutical development.

Practical value. The presented results can be used to select appropriate technologies for the development of modern pharmaceutical dosage forms based on micro- and nanostructured systems. The conclusions may be useful for pharmaceutical scientists, formulation developers, and industry professionals involved in improving drug performance and implementing innovative technological approaches in pharmaceutical research and manufacturing.

Keywords: electrospinning; spray drying; centrifugal fiber spinning; solid dispersions; nanofibers; drug delivery systems.