

УДК 677.076

ЄВЛАШКІН М. В.\*, СІВЕЦЬКИЙ В. І., СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., ШВАЧКО Д. Г.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕС СПОЛУЧЕННЯ НЕТКАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ З ДИСПЕРСНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

*Розглянуто процеси формування композитних нетканих полімерних полотен методом melt-blown із післяфільєрним термоконтактним введенням дисперсних наповнювачів у зоні укладання полотна. Мета досліджень – вдосконалення конструкції та режимів створення композиційного нетканого матеріалу шляхом запровадження гарячої віброподачі дисперсних частинок на приймальну підкладку. Для експериментальної перевірки пропонуваного метода створено стенд модуля гарячої вібродепозиції. Модуль складався з нагрітого вібраційного лотка, який подавав частинки при температурі, близької до температури плавлення матриці, інфрачервоного підсвічування волокнистого матеріалу, вібруючого колектора та закритої камери подачі повітряного потоку. Інфрачервоне підсвічування сприяє термоконтактному зв'язку дисперсних частинок з волокнами без додавання зв'язуючого, збереженню відкритої пористості та покращеній однорідності матеріалу. Відсутність імпрегнації/сушіння робить процес коротким і «сухим», що знижує енергоспоживання процесу та дозволяє відмовитися від великогабаритних сушильних секцій. Оптична мікроморфологія підтвердила селективну фіксацію частинок у вузлах без закупорення пор, що разом із відмовою від клеїв і розчинників та замкненим пилкоконтуром забезпечує високий рівень енергоефективності й екологічності процесу. Результати мікроскопічного аналізу показали, що структура отриманих волоконно-дисперсних композиційних матеріалів є однорідною, стабільною і придатною для використання як фільтрувальні, адсорбційні та абразивні матеріали.*

**Ключові слова:** melt-blown, дисперсні наповнювачі, віброподача, термоконтакт, енергоефективність

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2026.354344

\*Corresponding author: [mykhailo.yevlashkin@gmail.com](mailto:mykhailo.yevlashkin@gmail.com)

Received 11 September 2025; Accepted 13 November 2025

**Постановка проблеми.** Неткани полімерні матеріали, сформовані методом роздуву із розплаву (melt blown), стали базовою платформою для фільтрації, бар'єрних та функціональних шарів у виробі медичного, вентиляційного й промислового призначення; попит на високоєфективні фільтрувальні медіа зростає, що підтверджують галузеві огляди ринку HEPA/HVAC [1–4]. Актуальною задачею є одержати матеріали з високою селективністю та стабільним станом без застосування розчинників, клеїв і енергоємних стадій сушіння, зберігаючи при цьому низький опір потоку повітря [1, 3–7].

Традиційні шляхи введення функціональних твердих наповнювачів або змішують їх у розплаві (майстербатч), що зменшує відкриту поверхню частинок та підвищує в'язкість, або «посипають» у хмару волокон після фільт'єри, що спричинює пиління, нерівномірність і втрати дорогої сировини [3, 6, 8–13]. Додатковою вимогою стало впровадження біо основ (PLA) із вузьким термовікном, де перегрів веде до деградації та втрати механіки/зарядостійкості [14, 5, 3].

Вбачається велика перспектива в технології, яка б забезпечила кероване й надійне сполучення дисперсних наповнювачів з волокнистим матеріалом без клеїв, із мінімальними втратами та енергоспоживанням, і водночас зберігала стабільність структури волокна й відповідність стандартам випробувань (ISO 16890-3, EN 149, ASTM F2299) [15–17, 4, 7].

**Аналіз попередніх досліджень.** Базові залежності «термопрофіль – аеродинаміка – реологія» у методі отримання нетканих полімерних матеріалів роздувом із розплаву (melt blown) докладно описані у сучасних оглядах: діаметр волокон, пористість і структура вузлів перехрещень визначаються витратою розплаву, швидкістю/температурою гарячого повітря, геометрією губ щілини та відстанню «губа–підкладка» [1, 3–4, 6, 8–12]. Ефективність фільтрації залежить як від розміру пор та діаметра волокон, так і від наявності

електростатичного заряду; довготривала стабільність останнього посилюється гідрозарядом та світлостабілізацією [5, 4, 7].

У напрямі «сухої» інтеграції сипких наповнювачів простежується еволюція від простого післяфільтрного підсипання до складніших схем керованого осадження, включно з коформ сендвічами та безперервними частинковими фазами; разом із перевагами вони несуть аеродинамічну чутливість, пиління й зниження міцності при великих навантаженнях [13, 18–22]. Водночас, впровадження PLA носіїв вимагає м'яких режимів і антистатика [14, 23], а процес моніторингу температури, тиску і витрати підвищує відтворюваність параметрів полотна [23].

**Класифікація способів інтеграції твердих дисперсних наповнювачів.** Усі сучасні «сухі» способи інтеграції твердих дисперсних наповнювачів у melt blown полотна працюють у вузькому вікні аеротермодинаміки й реології розплаву: від стабільності температурного профілю на щілині й симетрії гарячих повітряних ножів залежить діаметр волокон, а від траєкторій частинок у зоні формування – їхня фіксація й рівномірність розподілу [3–4, 6–12]. Паралельно діють метрологічні обмеження за EN 149 та ISO 16890-3 щодо опору потоку й стабільності ефективності [7, 15–16].

Перший клас – післяфільтрне підсипання у «хмару» волокон. Базовим представником є WO 2006/052694 A1 [13]. На рис. 1 показано типовий дозувально-пневматичний тракт: з бункера 74 через вальцьовий вузол 78–82 та конус-горловину 86–88 частинки спрямовують у безпосередню близькість до щілини 64/66 melt blown головки. Ключовий принцип – ловити частинки в момент, коли волокна ще теплі й клейкі, але вже достатньо витягнуті повітряними ножами, щоб сформувати «петлі» навколо частинок. Перевага рішення – простота долучення до існуючих головок, збереження відкритої поверхні частинок (жодного занурення в розплав), висока продуктивність і масштабованість [3–4, 6–7]. Обмеження – аеродинамічна чутливість і «смугастість» за шириною при найменшій асиметрії повітряних полів; зростання пиління та падіння міцності при великих навантаженнях твердою фазою, адже полімерних містків стає менше [1, 3–4, 7]. В цій експериментальній конфігурації зберігається сам принцип післяфільтрного введення, але переводимо його з пневмоканалу на підігрітий вібралоток під капотом (рис. 1, поз. 10–12, 14), де частинки приходять уже гарячими, а тонкі волокна локально пом'якшує ІЧ джерело. Вібрація приймальної поверхні (15–16) стабілізує насипну структуру, а замкнений контур відбору пилу (17–20) повертає надлишок дрібної фракції до бункера дозатора 1. На практиці це зменшує розкид локального наповнення та пиління, що прямо поліпшує показники за ISO 16890-3 та стартову ефективність за ASTM F2299 [16–17].

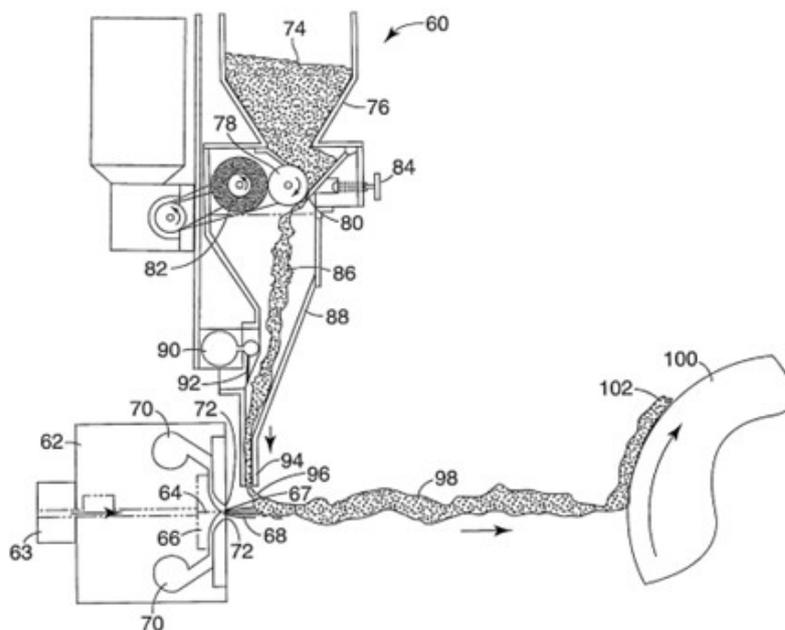
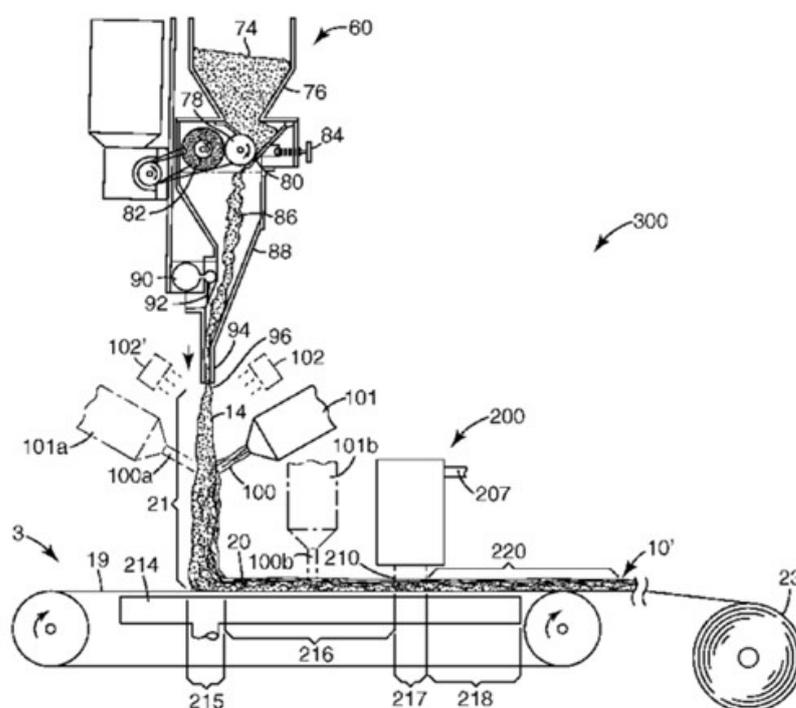


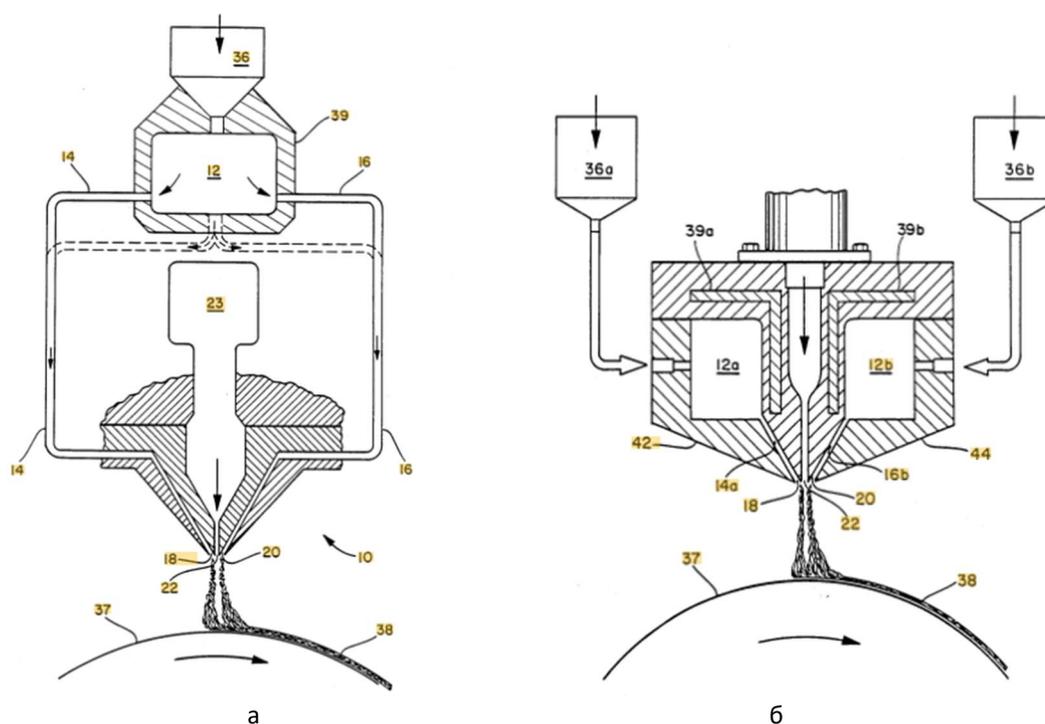
Рис. 1 – Дозувально-пневматичний тракт патенту WO 2006/052694 A1

Другий клас – формування безперервної частинкової фази, «прошитої» мікрОВОлокнами. Типовий приклад – WO 2009/088648 A1 (3M) [18]. На рис. 2 видно високонавантажений вертикальний канал, у якому спочатку нарощується пористий «каркас» із частинок, а вздовж каналу розміщені допоміжні вузли заряду/обдуву для керування агломерацією; далі каркас прошивається волокнами melt blown і укладається на конвеєр 214–220. Сутність підходу – навмисно створити 3D перколяційну сітку частинок, що забезпечує високу ємність за збереженої проникності, бо міжчастинкові канали не «заливаються» полімером [4, 7]. Компромислою є механіка (зниження проколу/розтягу), тож потрібні скрім армування чи ламінування. Процесне «вікно» вузьке: зміна пилової фракції або електростатики викликає провали перколяції та смугастість. Модуль «гарячої» вібродепозиції принципово не доводить до повної перколяції; він поєднує середні рівні наповнення ( $\approx 20\text{--}70$  мас. %) з термоконтактною фіксацією частинка–волокно під ІЧ пом'якшенням. Це збільшує кількість полімерних містків і покращує роботу до розриву без істотної втрати пористості; для підвищення навантаження можна додати верхнє полотно (друга МВ головка) й отримати тришаровий «сендвіч» без клеїв у стилі пізніших рішень [20, 22].



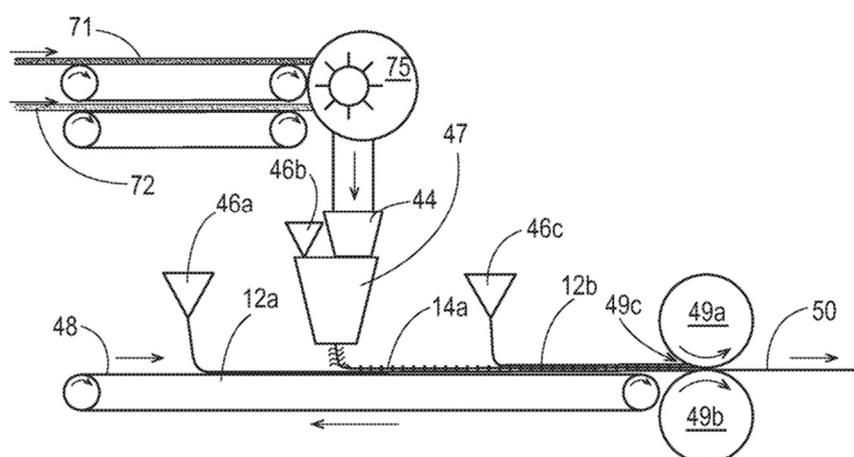
**Рис. 2 – Формування безперервної частинкової фази, «прошитої» мікрОВОлокнами згідно патенту WO 2009/088648 A1**

Третій клас – локалізоване «сендвічування» центральним струменем частинок. Історично канонічний приклад – US 4,818,464 [19]. На рис. 3 подано поперечний переріз співформувальної головки: центральним каналом іде струмінь частинок, з обох боків – melt blown щілини. Волокна обволікають центральний потік, механічно його «замикаючи». Переваги методу – чітка тришарова архітектура, контроль профілю за товщиною та можливість зонально дозувати частинки. Недоліки – технологічна чутливість до гранулометрії й електростатики центрального каналу, ризик «пробок» і несиметрій, особливо на мікропорошках високої густини.



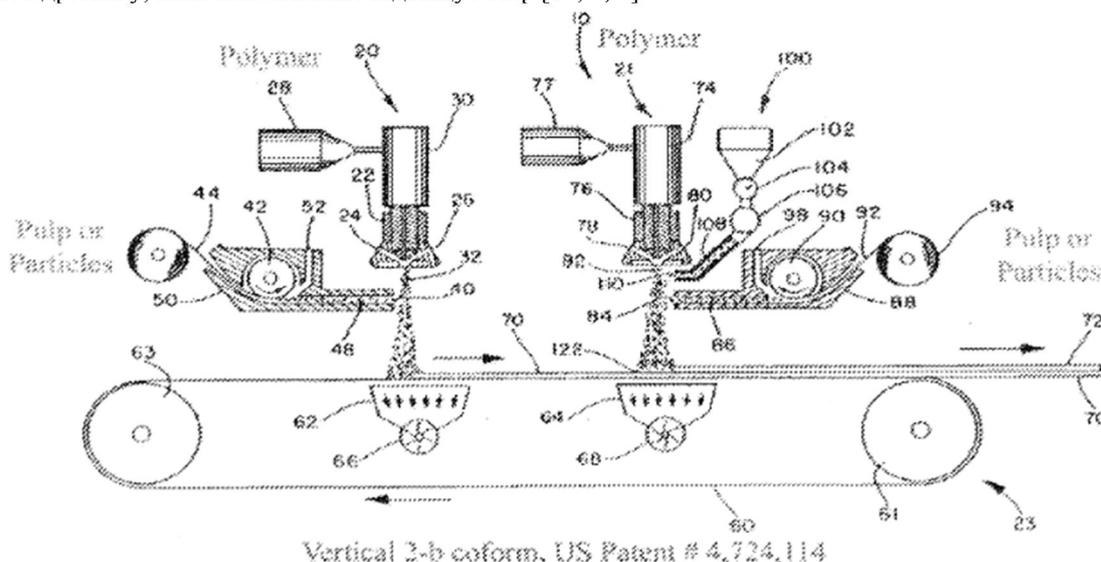
**Рис. 3 – Співформувальна головка з центральним каналом частинок за US 4,818,464:  
а – однокамерна головка; б – двокамерна (двостороння)**

Четвертий клас – тришарові поєднані архітектури з волокнистими обгортками для підвищення вологомощності й «несипкості» поверхні. У WO 2017/004115 A1 (P&G) [20] синхронно формують центральний шар («волокна + целюлоза»/частинки) й тонкі полімерні покритви з обох боків, що різко зменшує сипкість і підвищує міцність у вологому стані. На рис. 4 добре видно класичну melt blown головку з гарячими повітряними каналами 18a/18b, зону змішування 15–16, підкладку 19–21 і блок післяформувальної обробки 101/201. Перенесення цієї логіки на порошкові системи природне: гарячий сипкий шар з вібротатка можна накривати верхнім полотном і «прошивати» точками каландра, не закупорюючи пор. У результаті отримують «чисту» зовнішню поверхню, низьке пиління та підвищену зносостійкість при згині за збереження високої відкритості ядра для масообміну [4, 7, 20].



**Рис. 4 – Зустрічне формування двох холстів за патентом за патентом WO 2017/004115 A1**

П'ятий клас – екстремально наповнені безклеєві «сандвічі». US 2024/0426032 A1 описує матеріал, у якому центральний шар на  $\approx 99\%$  складається з функціональних частинок, а зверху й знизу – тонкі melt blown полотна, що механічно «зачиняють» порошок; клейових зв'язок немає, поверхня частинок повністю відкрита [22]. На рис. 5 подано технологічну схему такої лінії за [22]. Принцип роботи – зустрічне формування двох полотен, між якими гравітаційно-пневматично насаплюється шар частинок; у точці зустрічі волокна переплітаються крізь порошок і «замикають» його. Переваги – безпрецедентна ємність активної фази й повна відсутність клеїв; недоліки – вузьке процесне «вікно», механічна крихкість без додаткового армування та чутливість до товщини. У пропонуваній установці це граничний режим, якого можна досягти, якщо після вібродепозиції встановити другу МВ головку. Відмінність полягає у наявності рециркуляції та селекції фракцій, що дозволяє утримувати стабільні криві «ефективність–падіння тиску» за ISO 16890-3, видаляючи надлишок дрібняку, який найсильніше підвищує опір [16, 4, 7].



**Рис. 5 – Технологічна схема «сандвіч»-лінії за US 2024/0426032 A1**

Післяфільтрні схеми типу WO 2006/052694 A1 чудово зберігають відкриту поверхню частинок і прості в інтеграції, однак вимагають бездоганної симетрії повітряних полів [3, 6, 13]. Архітектури безперервної частинкової фази (WO 2009/088648 A1) дають рекордну ємність за низького падіння тиску, але слабкі в механіці; локальне підплавлення контактів у нашій зоні модифікації компенсує нестачу полімерних містків, не вбиваючи пористість [16, 4, 18]. Співформовані сандвічі з центральним каналом (US 4,818,464) структурно елегантні, проте схильні до «пробок» та антистатичних ефектів; відкритий віброток знімає ці ризики й підвищує ретенцію завдяки сумі ІЧ пом'якшення та вібрації [6, 19]. Тришарові обгортки (WO 2017/004115 A1) задають чисту поверхню й вологоміцність; для порошкових систем це природний спосіб додати зносостійкість без смол, зберігши відкритість ядра [4, 7, 20]. Екстремальні «99% частинок» (US 2024/0426032 A1) – інструмент для максимальної ємності; наш контур рекуперації пилу допомагає утримувати задану пермеабільність під стандарти ISO 16890-3/ASTM F2299 [16–17, 22].

Патентні рішення умовно діляться на «хмарні» післяфільтрні, «каркасні» безперервно частинкові, «сандвічні» з локалізованим каналом часток, обгорнуті полотном для стабілізації поверхні, «екстремально навантажені» без клеїв і «наноскінні» надбудови melt electrospinning. Усі вони вирішують різні задачі балансу між фіксацією часток, збереженням відкритої поверхні, механікою полотна, опором повітря та витратами енергії [3–4, 6–7, 13, 18–22].

**Загальна наукова проблема.** Невирішеною залишається проблема надійного поєднання з високим ступенем наповнення дисперсних наповнювачів з нетканим волокнистим матеріалом з низьким опором повітря та неспикістю структури без клеїв і розчинників у межах енергоощадної технології [3–7, 13, 16–23].

**Метою статті** є доведення життєздатності післяфільтрного, термокерованого введення дисперсних наповнювачів через гарячий віброток з локальним ІЧ пом'якшенням волокон і вібраційною прийнятною поверхнею, а також оцінка впливу конструктивних і режимних параметрів на морфологію, і енергоємність процесу.

**Виклад основного матеріалу.** Запропоновано вдосконалення процесу післяфільєрної інтеграції дисперсних частинок у melt blown полотна. Вдосконалений пристрій містить модуль гарячої вібродепозиції, що включає: підігрійтий віброток для доведення частинок до  $T_{add} \approx T_m$ , ІЧ підсвітку зони укладання для короткочасного пом'якшення поверхні мікрволокон та вібуючу приймальну підкладку для мікротискування частинок у вузли перехрещень; новим конструктивно-технологічним рішенням є поєднання термоконтактної фіксації без клеїв із замкненою рециркуляцією пилу (капот–циклон–НЕРА), що мінімізує втрати та вирівнює ширинну рівномірність наповнення. Працездатність рішення підтверджено оптичними випробуваннями отриманих композиційних матеріалів.

**Опис виконаних досліджень.** Запропонована модернізована установка розміщується у зоні укладання полотна за фільєрою та містить: віброток із підігрівом дисперсних частинок до температури плавлення полімеру-основи  $T_{add} \approx T_m \pm 5^\circ\text{C}$ ; ІЧ модуль, що пом'якшує поверхню мікрволокон; вібуючу приймальну поверхню, яка забезпечує мікротискування частинок у вузли перехрещень; капот із аспірацією, циклоном і НЕРА доочисткою для рециркуляції дрібної фракції. Такий «сухий» термоконтакт забезпечує фіксацію частинок без клеїв, зменшує пиління і стабілізує ширинну рівномірність наповнення. Геометрія та режими melt blown вузла витримані у канонічних межах [3, 6, 8–12]. У секції підсіпання прийнято амплітуду коливальних  $A = 0,25\text{--}0,45$  мм, частоту  $f = 35\text{--}60$  Гц; інтенсивність ІЧ  $4\text{--}8$  кВт·м<sup>2</sup>; крайову швидкість повітря в капоті  $\leq 0,5$  м·с<sup>-1</sup> — для мінімізації уносу частинок [4, 7, 13].

**Методична частина** включає оптичний аналіз мікрморфології (діаметр волокон і медіана пор), визначення перепаду тиску/пермеабільності за ISO 16890-3, стартової ефективності за ASTM F2299, а також баланс енергоспоживання секції підсіпання [16–17]. Для підвищення відтворюваності застосовується ін-процес моніторинг температур/тиску/витрат, описаний у сучасних оглядах з екструзійних процесів [23], із фокусом на стабілізацію термополя та симетрії повітряних ножів [3–4, 6].

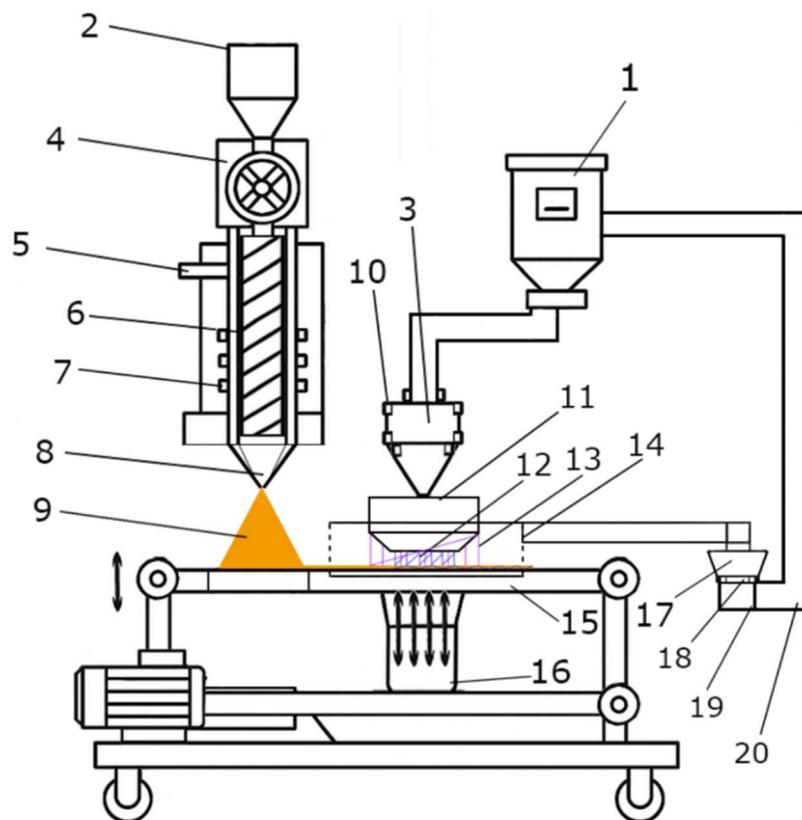
В експериментальній установці (див. схему на рис. 6) розглядається базове полотно melt blown (позиції 2, 4–9), а далі в зоні модифікації полотна працює закритий термокерований модуль із підігрітим вібротокком (позиції 10–12), ІЧ підсвіткою і вібуючою приймальною платформою (13–16) та рециркуляцією пилу через циклон і НЕРА (17–20). Цей вузол дозволяє подавати наповнювачі вже нагрітими ( $T_{add} \approx T_m$  полімеру матриці), частково «втискувати» їх у пом'якшені волокна й одночасно контролювати втрати та гранулометрію через відбір надлишку дрібної фракції [1, 14, 5, 3, 6, 23].

На відміну від класичних «хмарних» схем [13], критичною відмінністю є попередній підігрів частинок до температури плавлення полімеру матриці ( $T_{add} \approx T_m$ , допуск  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) з подачею їх на ще тепле МВ полотно у вікні 12 під ІЧ підсвіткою. Такий термоконтакт забезпечує поверхнєве «змочування» частинок розм'якшеними мікрволокнами без клеїв, із мінімізацією пиління та втрат активної фази [4, 7].

Пропонований прототип займає середину простору рішень: післяфільєрне, але термокероване введення; відкрита, але аспірована зона з вібраційним керуванням наповненням; помірні або високі витримувані навантаження. Саме таке поєднання забезпечує технологічну стійкість та енергоефективність. ІЧ капот і вібуюча платформа знижують чутливість до повітряних потоків, бо фіксація відбувається вже на гарячій підкладці, а не лише у «хмарі» волокон [3, 6, 13]. У контексті енергоефективності можна відзначити два додаткові аспекти. По-перше, відсутність імпрегнацій/сушіння робить процес коротким і «сухим», що знижує енергоспоживання на тонну продукції та дозволяє відмовитися від великогабаритних сушильних секцій; це співзвучно тенденціям до повністю термічних ліній на PLA [14, 3, 6, 21]. По-друге, замкнений пилоконтур (циклон → НЕРА → повернення до бункера 1) усуває найкоштовнішу втрату — викид дрібної фракції в аспірацію — і дає змогу працювати з дорогими функціональними порошками без підвищення собівартості, що критично на висококонкурентному ринку НЕРА/ULPA [2, 16, 4, 7].

**Матеріали, режими та контроль параметрів.** Базовий полімер: РР (комерційний МВ грейд;  $T_m = 165 \pm 3^\circ\text{C}$ ). Дисперсні системи: Наповнювач 1 — дрібний (модальний розмір 10–60 мкм; густина 2200–2600 кг·м<sup>-3</sup>), Наповнювач 2 — грубий (50–250 мкм;  $\rho = 2500\text{--}2700$  кг·м<sup>-3</sup>). Модальні діаметри волокон 15–22 мкм. Параметри модифікаційної зони:  $T_{add} \approx T_m$  (РР:  $165 \pm 5^\circ\text{C}$ ; PLA:  $155 \pm 5^\circ\text{C}$ ), вібрація приймальної платформи з частотою  $f = 38\text{--}58$  Гц, амплітудою  $A = 0,28\text{--}0,42$  мм.

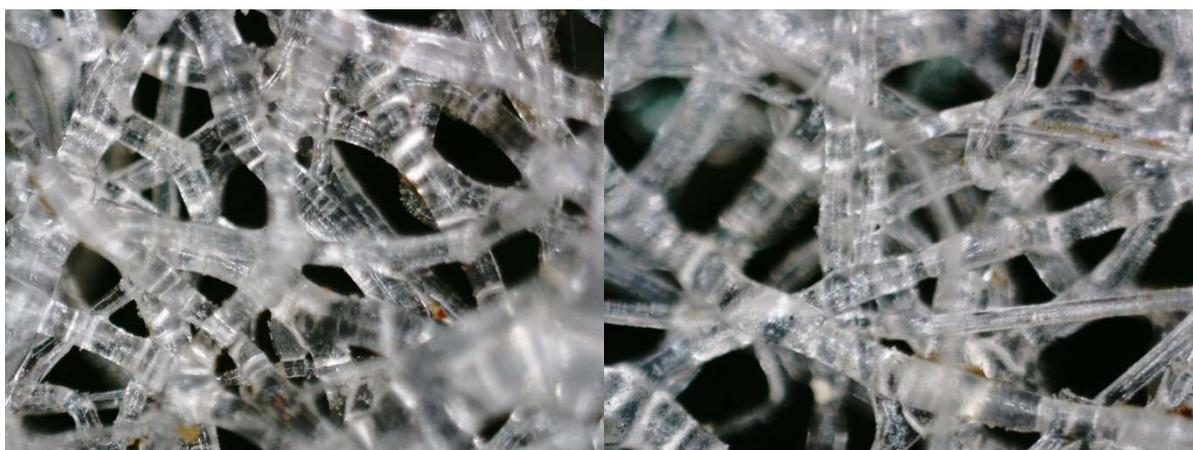
**Результати і обговорення.** Оскільки енергія на підігрів частинок до  $T_m$  масштабується з їх масовою часткою та питомою теплоємністю ( $\approx 0,8\text{--}0,9$  кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для типових твердих матеріалів), то за 50 мас.% додаткові витрати на ІЧ нагрів становлять  $\sim 0,04\text{--}0,05$  кВт·год·кг<sup>-1</sup>, ще  $0,01\text{--}0,02$  кВт·год·кг<sup>-1</sup> припадає на вібропривід і аспірацію; у сумі  $0,05\text{--}0,07$  кВт·год·кг<sup>-1</sup> для цього режиму. В діапазоні 20–50 мас.% сумарні витрати становлять  $0,03\text{--}0,07$  кВт·год·кг<sup>-1</sup> — суттєво менше, ніж для клейових/просочних технологій із сушінням; процес розчинниково вільний, що знижує викиди ЛОС і спрощує екологічне узгодження [14, 3–4]. Замкнений контур «капот → циклон → НЕРА → повернення» практично усуває втрати дрібної фракції, зменшуючи запиленість робочої зони й утилізаційний слід [16].



1 – гравітаційний дозатор; 2 – зона подачі полімеру; 3 – зона подачі наповнювача; 4 – роторний шлюз; 5 – повітря для видування; 6 – екструдер; 7 – терморегулятори; 8 – філь’єри; 9 – зона формування волокна; 10 – нагрівачі; 11 – віброток; 12 – зона модифікації полотна; 13 – ІЧ-світло; 14 – капот; 15 – вібруюча поверхня; 16 – вібромашина; 17 – циклон; 18 – НЕРА-фільтр; 19 – малий бункер; 20 – шлях повернення в дозатор

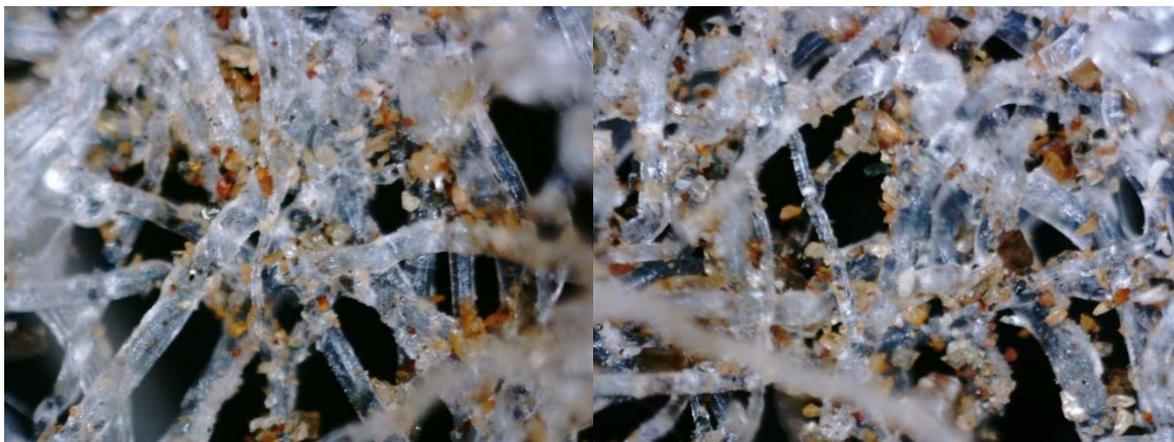
**Рис. 6 – Схема пропонованої установки**

Спостерігається типова «павутинна» мережа МВ з випадковою орієнтацією волокон; середній діаметр 15–19 мкм, медіана пор 118–132 мкм. Вузли перехрещень — із помірними потовщеннями, що відповідає поверхневій густині 24–26 г·м<sup>-2</sup> та пористості 92–93% [3, 6].



**Рис. 7 – Чистий шар з випадковою орієнтацією волокон із модальним діаметром 15–20 мкм; діаметр пор 120–135 мкм**

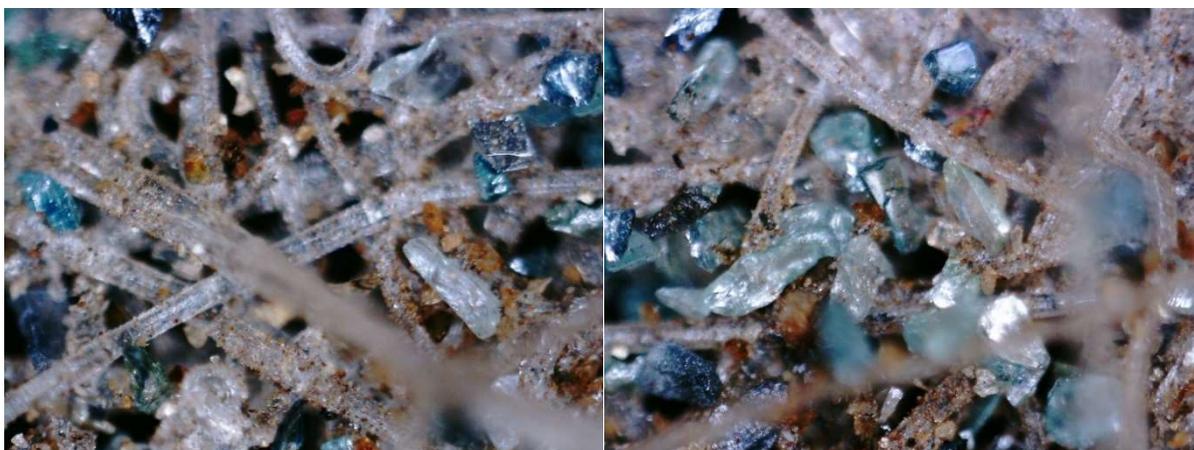
На рис. 8 показано результати сполучення з дрібною фракцією частинок. Частинки локалізуються у вузлах, обрамлені гало 15–40 мкм; пори ізотропізуються до 80–90 мкм.



**Рис. 8 – Результати сполучення з дрібною фракцією 10–60 мкм**

Частинки рівномірно локалізуються у вузлах мережі, візуально фіксуються світлі гало діаметром 15–40 мкм — слід тонкого перетікання полімеру під ІЧ. Вільних частинок поза вузлами майже не виявлено. Медіана пор падає до 80–86 мкм, помірно зростає оптична щільність. При зростанні наповнення з 28 % до 32 % мас. не спостерігалось різкого переходу до суцільної частинкової фази — полімерні містки зберігаються [4, 7].

На рис. 9 показано результати сполучення з крупною фракцією частинок. «Містки» між шарами зберігають полімерну «сорочку»; пористість падає контрольовано ( $\approx 80\text{--}82\%$ ), вмикається інерційний механізм захоплення [4, 7].



**Рис. 9 – Результати сполучення з крупною фракцією частинок, 50–250 мкм**

Варіант установки з підігрітим вібрототком, ІЧ модулем, віброуючою підкладкою і рециркуляцією пилу знімає недоліки класичного «хмарного» підсіпання, підводить його за фіксацією до дофільєрних ефектів, але зберігає простоту і чистоту «сухого» процесу. Вона сумісна з PLA основами та з каскадним ламінуванням шарів, а також дозволяє оптимізувати криву «ефективність фільтрування — падіння тиску» завдяки незалежному керуванню масовою подачею часток, термоконтактом на волокнах і тонкоселекційною надбудовою [14, 3–4, 7, 21–26]. Ключова відмінність від «холодної» підсіпки полягає в тому, що частинка приходить на волокно при температурі плавлення полімеру основи, а поверхня самого волокна в момент

контакту — у стані короткочасного ПЧ пом'якшення. Це створює тонкий «в'язкопружний» шар завтовшки соті долі мікрона, у який частинка входить під дією мікроударів від вібрації [4, 7].

**Висновок.** Розглянуто процеси формування композитних нетканих полімерних полотен із післяфільтрним термоконтатним введенням дисперсних наповнювачів. Запропоновано власне рішення з конструктивного і технологічного оформлення процесу. Виконано тестові випробування методу, які показали його економічну доцільність та технічну обґрунтованість. Результати мікроскопічного аналізу показали, що структура отриманих композиційних матеріалів є однорідною та стабільною і придатною для використання як фільтрувальні, адсорбційні та абразивні матеріали. Тести підтвердили, що гаряча вібродепозиція при  $T_{add} \approx T_m$  полімеру основи забезпечує керовану фіксацію твердих частинок у вузлах волокон без клеїв. Запропонована схема дає збалансоване рішення між ефективністю, опором, енерговитратами й екологічністю. Вона технологічно простіша та стійкіша за «холодні» підсилення й гнучкіша за вузькоканальні схеми [5]; у випадку потреби може масштабуватись до сендвіч-архітектур або доповнюватись нанощарами melt electrospinning, зберігаючи повністю термічний, розчинниково вільний ланцюжок [3–4, 6–7, 19–22, 24–26].

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому передбачається створення установки для дослідження адсорбційних і фільтрувальних спроможностей отримуваних матеріалів, а також проведення аналізу структури отриманих матеріалів за допомогою цифрових методів обробки зображень [23, 16–17].

#### **Список використаної літератури**

1. Kara Y.; Molnár K. A review of processing strategies to generate melt-blown nano/microfiber mats for high-efficiency filtration applications. *Journal of Industrial Textiles*. 2022. 51(1S). P. 137S–180S. DOI: 10.1177/15280837211019488. URL: <https://doi.org/10.1177/15280837211019488>.
2. Straits Research. *Global HEPA Filters Market 2025–2033*. 2023. URL: <https://www.straitsresearch.com/report/hepa-filters-market>
3. Fang Z., Luo Z., Zhang X. Advancements in Research and Applications of PP-Based Materials Utilizing Melt-Blown Nonwoven Technology. *Polymers*. 2025. 17(8). 1013. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17081013> (MDPI page: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/8/1013>)
4. Hutten I. *Handbook of Nonwoven Filter Media*. 2nd ed. Elsevier, 2015. ISBN 9780080983011. Publisher page: <https://shop.elsevier.com/books/handbook-of-nonwoven-filter-media/hutten/978-0-08-098301-1>
5. Lin, J.-H.; Lin, Y.-Y.; Sue, Y.-M.; Lin, M.-C.; Chen, Y.-S.; Lou, C.-W. Long-Lasting Electret Melt-Blown Nonwoven Functional Filters Made of Organic/Inorganic Macromolecular Micron Materials: Manufacturing Techniques and Property Evaluations. *Polymers*, 2023, 15(10), 2306. DOI: 10.3390/polym15102306. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/10/2306>
6. Zamani, S., Morshed, M., & Zarrebini, M. *Melt blowing process: I. Formation mechanism of microfibers from polymer melt*. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. 127(5). P. 3594–3604. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.37837>
7. Brown R. *Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*. Pergamon, 1993. P. 156–205.
8. Rauwendaal C. *Understanding Extrusion*. Hanser, 2010. P. 1–120; 249–291. Publisher page: <https://www.hanser-elibrary.com/isbn/9781569906989>
9. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. 5th ed. Hanser, 2014. P. 159–196; 282–312; 617–651. Publisher : <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569905395>
10. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of Polymer Processing*. 2nd ed. Wiley, 2006. P. 434–496; 525–587.
11. Agassant J.F., Avenas P., Carreau P.J., Vergnes B., Vincent M. *Polymer Processing: Principles and Modeling*. 2nd ed. Hanser, 2017. P. 245–274; 301–332.
12. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N.D. *Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion*. Polydynamics Inc., 2019. Part A, P. 52–106.
13. WO 2006/052694 A1. BOIB (PCT). *Particle-containing fibrous web*. МПК D04H 1/56, A62B 7/10, опубл. 18.05.2006. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2006052694A1/>
14. Han, S.O., Cho, D., Kim, Y.S., et al. *Environmentally friendly biopolymer nanofiber filters for high-efficiency PM2.5 capture*. *Polymer Degradation and Stability*. 2019. 165. P. 185–192.
15. EN 149:2001+A1:2009. *Respiratory protective devices — Filtering half masks to protect against particles — Requirements, testing, marking*. CEN, 2009.
16. ISO 16890-3:2024. *Air filters for general ventilation — Part 3: Determination of permeability and resistance to airflow*. ISO, 2024.

17. ASTM F2299/F2299M-23. *Standard Test Method for Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres*. ASTM International, 2023.
18. WO 2009/088648 A1. BOIB (PCT). *Composite non-woven fibrous webs having continuous particulate phase and methods of making and using the same*. МПК D04H 1/42, D04H 1/70, D04H 11/54, опубл. 16.07.2009. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2009088648A1/>
19. US 4,818,464. США. *Extrusion process using a central air jet*. МПК B65H 54/00, опубл. 04.04.1989. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US4818464A/>
20. WO 2017/004115 A1. BOIB (PCT). *Enhanced co-formed/meltblown fibrous web*. МПК D04H 1/56, D04H 3/14, D04H 3/16, D04H 13/00, B32B 5/02, B32B 5/26, опубл. 05.01.2017. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2017004115A1/>
21. WO 2016/033097 A1. BOIB (PCT). *Spunbonded web comprising polylactic acid fibers*. МПК D04H 11/435, опубл. 03.03.2016. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2016033097A1/>
22. US 2024/0426032 A1. США. *Non-shedding hybrid nonwovens and method of producing same*. МПК D04H 1/56, B01D 39/16, опубл. 26.12.2024. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US20240426032A1/>
23. Sharma S., Johnson K. In-process monitoring technologies in polymer extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. 82. P. 210–227. (Publisher) <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-processes>
24. US 12,221,722 B2. США. *Melt electrospinning device and method*. МПК D01D 5/00, D01D 1/04, D01F 9/08, вид. 11.02.2025. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US12221722B2/>
25. US 7,326,043 B2. США. *Apparatus and method for elevated temperature electrospinning*. МПК B29B 13/08, вид. 05.02.2008. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US7326043B2/>
26. US 2016/0193555 A1. США. *Multi-layered nanofiber medium using electro-blowing, melt-blowing or electrospinning, and method for manufacturing same*. МПК B01D 39/16, B29C 70/02, опубл. 07.07.2016. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US20160193555A1/>
27. Shiu B.C., Zhang Y., Yuan Q., et al. Ag@ZIF-8@PP melt-blown nonwovens: filtration and antibacterial performance. *Polymers*. 2021. 13(21). Article 3773. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13213773>
28. de Araújo L.O., Anaya K., Pergher S.B.C. Antimicrobial LDPE films with Ag-modified zeolite A. *Coatings*. 2019. 9(12). 786. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9120786>
29. *Water Technology Magazine*. «Zeolite filtration media – setting a new standard for water filtration». *Water Technology Magazine*. Issue 6 (May–June 2014), P. 28–31. London: Elsevier Business Intelligence, 2014.
30. Liu J.H., Yazdi R., Wu Y. Ultrasonically assisted extrusion of polypropylene nanocomposites. *Polymers*. 2025. 17(2). 341. (MDPI page: <https://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5431>)

---

**Mykhailo Yevlashkin, Volodymyr Sivetskyi, Oleksandr Sokolskyi, Denys Shvachko**

## **EQUIPMENT AND PROCESS FOR JOINING MELT BLOWN NONWOVENS WITH DISPERSED FILLERS**

*A binder free route is presented for coupling solid particles with melt blown (MB) polymer webs while maintaining low airflow resistance. The approach targets post die thermocontact fixation on the lay down zone using hot vibrodeposition, infrared softening, and a closed dust recirculation loop to improve uniformity and material efficiency.*

*Polypropylene (PP); melting temperature  $T_m=165\pm 3$ , MB webs served as the base; feasibility with polylactide (PLA) was checked by shifting the thermal window. Two particulate cuts were used: a fine fraction with modal size 10–60  $\mu\text{m}$  and a coarse fraction 50–250  $\mu\text{m}$ . The module comprised a heated vibratory tray delivering particles at an addition temperature near the matrix melting point ( $T_{add}\approx T_m$ ), infrared (IR) illumination of the lay down window, a vibrating collector, and a closed hood–cyclone–high efficiency particulate air (HEPA) return. Calibrated optical microscopy provided fiber diameter and pore statistics; permeability/pressure drop and initial particle capture were evaluated to International Organization for Standardization (ISO) 16890 3 and American Society for Testing and Materials (ASTM) F2299 practice; electric power of IR, vibration, and aspiration was logged for an energy balance. Selective, node centered fixation of particles was achieved without pore blockage or adhesive use. On pristine MB webs the fiber diameter lay around 15–19  $\mu\text{m}$ , the pore size median at 118–132  $\mu\text{m}$ , and nodes showed modest thickening consistent with a basis weight near 24–26  $\text{g m}^{-2}$  and porosity of roughly 92–93%. After dosing with the*

fine fraction, particles concentrated at fiber junctions and were encircled by bright halos 15–40  $\mu\text{m}$  across—signatures of brief surface flow under IR. Free grains outside nodes were rare, and the pore median contracted to about 80–86  $\mu\text{m}$  while through pore continuity remained, explaining retention of low flow resistance at comparable surface densities. With the coarse fraction, interlayer “bridges” formed and were jacketed by a thin polymer envelope rather than being buried in bulk polymer; the global porosity declined in a controlled manner toward ~80–82 %, yet open channels persisted through the core.

Process parameters were coordinated to localize softening to the lay down window and to drive micro indentation rather than compaction. Representative, reproducible settings were:  $T_{add} \approx T_m$  (PP: 165 $\pm$ 5 $^\circ\text{C}$ ; PLA: 155 $\pm$ 5 $^\circ\text{C}$ ), collector vibration at 38–58 Hz with 0.28–0.42 mm amplitude, IR irradiance in the 4–8  $\text{kW m}^{-2}$  band, and hood edge air velocity not exceeding ~0.5  $\text{m s}^{-1}$  to limit fines entrainment. Under these conditions, contact neck formation probability at fiber–particle interfaces increased, raising retention specifically at nodes, which in turn supported favourable permeability–pressure drop behaviour and stable initial efficiency in particle penetration tests. Cross web uniformity benefited from depositing onto a warm, vibrating collector rather than sprinkling into a free fiber cloud: vibration stabilized the granular layer before fixation; IR softened only the microfiber surface and avoided bulk melting. In practice this combination reduced local loading scatter and visible dusting.

Energy additions from the module were modest relative to thermal impregnation/drying chains. At representative mid loadings the specific energy summed to ~0.05–0.07  $\text{kWh kg}^{-1}$  (IR as the dominant share; vibration and aspiration the remainder); across 20–50 mass % particulate loadings the range was ~0.03–0.07  $\text{kWh kg}^{-1}$ . The route remained solvent free, shortened the process flow, and reduced volatile emissions. The closed hood–cyclone–HEPA loop returned fines to the dispenser, decreasing material loss of costly functional powders and improving housekeeping at the enclosure edge. Compatibility with biobased carriers followed from respecting their narrower thermal window (PLA  $T_m \approx 155^\circ\text{C}$ ). In addition, the platform supports architectural variants: adding an upper MB veil and light point calendaring “stitches” the particulate layer to improve surface cleanliness and bend durability while keeping the core open; installing a second MB head enables three layer, adhesive free “sandwich” structures while fines recirculation helps hold the target permeability by limiting ultrafine overload that disproportionately raises resistance.

Hot vibrodeposition at an addition temperature close to the matrix melting point enables binder free thermocontact coupling of disperse particles to melt blown fibers with node selective fixation, preserved open porosity, improved cross web uniformity, and low added energy. The scheme is scalable and compatible with PLA carriers, providing a clean, fully thermal process chain.

**Keywords:** melt blown, particulate fillers, vibro feeding, thermal contact, energy efficiency

### References

1. Kara Y.; Molnár K. A review of processing strategies to generate melt-blown nano/microfiber mats for high-efficiency filtration applications. *Journal of Industrial Textiles*. 2022. 51(1S). P. 137S–180S. DOI: 10.1177/15280837211019488. URL: <https://doi.org/10.1177/15280837211019488>.
2. Straits Research. *Global HEPA Filters Market 2025–2033*. 2023. URL: <https://www.straitsresearch.com/report/hepa-filters-market>
3. Fang Z., Luo Z., Zhang X. Advancements in Research and Applications of PP-Based Materials Utilizing Melt-Blown Nonwoven Technology. *Polymers*. 2025. 17(8). 1013. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17081013> (MDPI page: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/8/1013>)
4. Hutten I. *Handbook of Nonwoven Filter Media*. 2nd ed. Elsevier, 2015. ISBN 9780080983011. Publisher page: <https://shop.elsevier.com/books/handbook-of-nonwoven-filter-media/hutten/978-0-08-098301-1>
5. Lin, J.-H.; Lin, Y.-Y.; Sue, Y.-M.; Lin, M.-C.; Chen, Y.-S.; Lou, C.-W. Long-Lasting Electret Melt-Blown Nonwoven Functional Filters Made of Organic/Inorganic Macromolecular Micron Materials: Manufacturing Techniques and Property Evaluations. *Polymers*, 2023, 15(10), 2306. DOI: 10.3390/polym15102306. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/10/2306>
6. Zamani, S., Morshed, M., & Zarrebini, M. *Melt blowing process: I. Formation mechanism of microfibers from polymer melt*. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. 127(5). P. 3594–3604. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.37837>
7. Brown R. *Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*. Pergamon, 1993. P. 156–205.
8. Rauwendaal C. *Understanding Extrusion*. Hanser, 2010. P. 1–120; 249–291. Publisher page: <https://www.hanser-elibrary.com/isbn/9781569906989>

9. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*. 5th ed. Hanser, 2014. P. 159–196; 282–312; 617–651. Publisher : <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569905395>
10. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of Polymer Processing*. 2nd ed. Wiley, 2006. P. 434–496; 525–587.
11. Agassant J.F., Avenas P., Carreau P.J., Vergnes B., Vincent M. *Polymer Processing: Principles and Modeling*. 2nd ed. Hanser, 2017. P. 245–274; 301–332.
12. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N.D. *Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion*. Polydynamics Inc., 2019. Part A, P. 52–106.
13. WO 2006/052694 A1. BOIB (PCT). *Particle-containing fibrous web*. МПК D04H 1/56, A62B 7/10, опубл. 18.05.2006. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2006052694A1/>
14. Han, S.O., Cho, D., Kim, Y.S., et al. *Environmentally friendly biopolymer nanofiber filters for high-efficiency PM2.5 capture*. *Polymer Degradation and Stability*. 2019. 165. P. 185–192.
15. EN 149:2001+A1:2009. *Respiratory protective devices — Filtering half masks to protect against particles — Requirements, testing, marking*. CEN, 2009.
16. ISO 16890-3:2024. *Air filters for general ventilation — Part 3: Determination of permeability and resistance to airflow*. ISO, 2024.
17. ASTM F2299/F2299M-23. *Standard Test Method for Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres*. ASTM International, 2023.
18. WO 2009/088648 A1. BOIB (PCT). *Composite non-woven fibrous webs having continuous particulate phase and methods of making and using the same*. МПК D04H 1/42, D04H 1/70, D04H 11/54, опубл. 16.07.2009. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2009088648A1/>
19. US 4,818,464. США. *Extrusion process using a central air jet*. МПК B65H 54/00, опубл. 04.04.1989. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US4818464A/>
20. WO 2017/004115 A1. BOIB (PCT). *Enhanced co-formed/meltblown fibrous web*. МПК D04H 1/56, D04H 3/14, D04H 3/16, D04H 13/00, B32B 5/02, B32B 5/26, опубл. 05.01.2017. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2017004115A1/>
21. WO 2016/033097 A1. BOIB (PCT). *Spunbonded web comprising polylactic acid fibers*. МПК D04H 11/435, опубл. 03.03.2016. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/WO2016033097A1/>
22. US 2024/0426032 A1. США. *Non-shedding hybrid nonwovens and method of producing same*. МПК D04H 1/56, B01D 39/16, опубл. 26.12.2024. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US20240426032A1/>
23. Sharma S., Johnson K. In-process monitoring technologies in polymer extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. 82. P. 210–227. (Publisher) <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-processes>
24. US 12,221,722 B2. США. *Melt electrospinning device and method*. МПК D01D 5/00, D01D 1/04, D01F 9/08, вид. 11.02.2025. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US12221722B2/>
25. US 7,326,043 B2. США. *Apparatus and method for elevated temperature electrospinning*. МПК B29B 13/08, вид. 05.02.2008. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US7326043B2/>
26. US 2016/0193555 A1. США. *Multi-layered nanofiber medium using electro-blowing, melt-blowing or electrospinning, and method for manufacturing same*. МПК B01D 39/16, B29C 70/02, опубл. 07.07.2016. Google Patents: <https://patents.google.com/patent/US20160193555A1/>
27. Shiu B.C., Zhang Y., Yuan Q., et al. Ag@ZIF-8@PP melt-blown nonwovens: filtration and antibacterial performance. *Polymers*. 2021. 13(21). Article 3773. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13213773>
28. de Araújo L.O., Anaya K., Pergher S.B.C. Antimicrobial LDPE films with Ag-modified zeolite A. *Coatings*. 2019. 9(12). 786. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9120786>
29. *Water Technology Magazine*. «Zeolite filtration media – setting a new standard for water filtration». *Water Technology Magazine*. Issue 6 (May–June 2014), P. 28–31. London: Elsevier Business Intelligence, 2014.
30. Liu J.H., Yazdi R., Wu Y. Ultrasonically assisted extrusion of polypropylene nanocomposites. *Polymers*. 2025. 17(2). 341. (MDPI page: <https://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5431>)