

Фільтраційне обладнання систем аспірації, вентиляції та пневмотранспорту в промисловості: особливості експлуатації, проблеми аеродинаміки та шляхи їх вирішення

А. О. Кокколенко¹ • В. М. Турик¹

Received: 17 April 2025 / Revised: 29 May 2025 / Accepted: 2 June 2025

Анотація. У статті розглянуто фільтраційне обладнання, що застосовується в аспіраційних, вентиляційних і пневмотранспортних системах на промислових підприємствах. Визначено ключові напрями його використання: очищення повітря робочого середовища, розділення газо- та твердофазних компонентів у процесі транспортування сипучих матеріалів, забезпечення необхідного повітрообміну в приміщеннях. Проаналізовано історичні етапи розвитку конструкцій фільтраційних пристроїв – від циклонів до сучасних картриджних, рукавних, електростатичних і тумановловлювальних фільтрів. Значну увагу приділено аеродинамічним особливостям робочих процесів, які впливають на ефективність функціонування систем. Дета зниження продуктивності, нерівномірного навантаження на фільтрувальні елементи, збільшення енергоспоживання та передчасного зносу обладнання. Розглянуто типові технічні та автоматизовані рішення, щодо вирівнювання розподілу потоків, удосконалення системи регенерації фільтрувальних елементів, покращення вибухо- та пожежобезпеки установок. Розглянуто сучасні технології матеріалознавства та комп'ютерного моделювання для розробки фільтрувальних елементів з покращеними властивостями. Проведено аналіз причин утворення нерівномірного руху повітря в колекторних системах і обґрунтовано необхідність розробки точніших аналітичних моделей для прогнозування аеродинаміки та підвищення ефективності функціонування фільтраційних агрегатів у реальних промислових умовах.

Ключові слова: аеродинаміка промислових апаратів; фільтрація; вентиляція; аспірація; пневмотранспорт; автоматичне керування.

Вступ

Робота машинобудівних та енергетичних підприємств та промислових будівель завжди супроводжується викидами речовин, небезпечних для робітників та навколишнього середовища. Вплив небезпечних викидів залежить від частоти, тривалості та рівня забруднення повітря. Неприятливий вплив на здоров'я людей, флору й фауну може виникнути одразу після викиду продукту (наприклад, вплив чадного газу) або після тривалого періоду дії забруднень (наприклад, вплив азбесту). Один з найпоширеніших способів локалізації та видалення з потоком повітря шкідливих дрібних сухих речовин (пилу, стружки, тирси та ін.) з

робочих зон різного роду верстатів, агрегатів та обладнання підприємств по переробці сировини є використання аспіраційних інженерних пневмосистем. Принцип їх дії полягає у відведенні забрудненого повітря, подальшій його фільтрації, тобто відділенні твердої компоненти від повітря в тканинних фільтроелементах, та у викиді чистого повітря в робочу зону підприємств або поза межами їх [1]. Кількість забрудненого повітря, що відсмоктується, визначається, насамперед, виконанням головної функції аспіраційних і фільтраційних систем – захисту навколишнього середовища і здоров'я людей, а не виходячи з умов з надійності та економічності транспортування відходів трубопроводами, хоча останні питання є також важливими.

Апарати аспірації можуть використовувати не тільки для очищення робочих приміщень та цехів, але й для відокремлення твердої компоненти від газоподібної в системах пневмотранспорту сипучих середовищ. В таких системах реалізується примусове переміщення широкого спектру порошкоподібних та гранульованих

✉ А. О. Кокколенко
arturkokolenkoolegovich@gmail.com

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

твердих речовин у потоці газу. Транспортування відбувається через трубопроводи, під дією тиску повітря чи іншого газу. Галузі, в яких сипучі матеріали транспортуються пневмотранспортом, включають сільське господарство, хімічну, фармацевтичну, лакофарбову, гірничодобувну, мінеральну промисловість, харчову, сталеливарну, пластикову, машинобудівну та електроенергетичну галузі. Пневмотранспортні операції можуть включати внутрішньозаводське переміщення матеріалів між стадіями технологічного процесу, наприклад, переміщення сировини з виробничої зони до бункерів зберігання [2]. В кінці процесу проходить відокремлення продукту від газу-носія, у випадку використання аспіраційних агрегатів тверді матеріали відфільтровуються, а очищене повітря повертається в систему.

Вентиляційні системи відповідають за процес циркуляції повітря в приміщенні, забезпечуючи свіжий приплив повітря та видалення витратного. Це важливо для підтримання оптимального рівня кисню, вологості та комфорту для життя й роботи. Вентиляція може бути здійснена за допомогою природних або механічних систем. Фільтраційні системи вентиляції являють собою картриджні або карманні тканині елементи, що слугують захистом робочого приміщення та повітропровідних каналів від пилу, диму, неприємних запахів та інших негативних факторів. Відмінність аспірації від фільтраційних систем вентиляції полягає в тому, що аспіраційні системи працюють переважно на видалення пилових частинок, використовуючи повітря як носій сухих забруднень, а робота фільтрів вентиляційних систем зосереджена на уловлюванні частинок пилу при притоці повітря до промислових приміщень з врахуванням керування потоками повітря з метою здійснення необхідних повітрообмінів для підтримки рівня кисню та видалення використаного повітря. Разом з тим, використання систем аспірації значно спрощує та полегшує експлуатацію загальнообмінної вентиляційної системи та фільтрів у ній. Якщо вентиляція та аспірація налаштовані технологічно правильно, то вентиляційній системі залишається забезпечувати лише достатній повітрообмін і приміщенні повітряних мас (без використання спеціальних фільтрів у вентиляційних каналах), але сучасні неправильні розрахунки та нерозуміння точного процесу руху однофазного чи двофазного потоку призводять до зниження ефективності таких систем, завищених енергозатрат, збитків машинобудівних підприємств тощо.

Тому, метою нашого дослідження є всебічний аналіз конструкцій, принципів дії та експлуатаційних особливостей фільтраційного обладнання, що використовується в системах аспірації, вентиляції та пневмотранспорту, з акцентом на виявлення недоліків у роботі існуючих систем, дослідження аеродинамічних проблем нерівномірного розподілу повітря в розгалужених мережах, а також майбутнє розроблення і обґрун-

тування технічних та автоматизованих рішень для підвищення ефективності, надійності та енергоефективності цих систем у промислових умовах на основі отриманих даних.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Активне використання вентиляційних та аспіраційних систем почалося наприкінці 1800-х років та набрало широку популярність у США під час промислової революції. Однією з перших розробок в області відділення пилу від повітря можна приписати Джону М. Фінчу – розробнику циклонного пиловловлювача. У 1885 році він запатентував перший прототип пристрою, спосіб дії якого полягав у використанні відцентрової сили для відділення твердих частинок від газу [3].

Більшість ранніх циклонів використовувалися для збору пилу, що утворювався на млинах чи деревообробних підприємствах. У наступні десятиліття, що минули після цього, циклонні агрегати знайшли застосування практично у всіх галузях промисловості [4]. Подібних за принципом дії конструкцій використовуються й зараз, але відносяться до групи так званої “пресепації”, а саме виробів, які фільтрують великі фракції продукту та встановлюються перед аспіраційними пневмоустановками.

Винайдення першого аспіраційного фільтра є предметом суперечок, дехто приписує винахід Вільгельму Бету, який створив конструкцію на основі звичайного тканевого фільтра, а дехто – Джону Фінчу. У середині 1920-х років значний прогрес аспіраційних агрегатів стався завдяки винаходу Вільгельма Бета – струшувального пиловловлювача (Рис. 1). Фільтрувальні елементи в цій системі самоочищаються за допомогою вібраційного двигуна, прикріпленого до рами, який струшує фільтрувальні мішки, щоб витіснити накопичений пил. З часом конструкція пиловловлювача з вібраційним очищенням була вдосконалена, в ній з'явилися кращі фільтроелементи, здатні вловлювати дрібніші частинки, зберігаючи при цьому значення оптимальної витрати повітряного потоку і збільшуючи ефективність пиловловлювання. Хоча пиловловлювачі такого типу використовуються і сьогодні, їхня популярність знизилася через відносно низьке співвідношення витрати повітря до площі фільтрації, а також через великі габарити пристрою.

В середині 1950-х років було розроблено реверсивні фільтри (очищення способом зворотної продувки), що дозволило забезпечувати ефективніше очищення елементів, а невдовзі було розроблено спосіб імпульсної очистки (з використанням напрямленого струменя стисненого повітря для збиття пилу з тканини). Імпульсний спосіб регенерації активно використовується і в наш час та є найпоширенішим способом

очистки елементів від пилу (Рис. 2). Використання імпульсної регенерації супроводжувалось впровадженням каркасу у фільтрелементах.

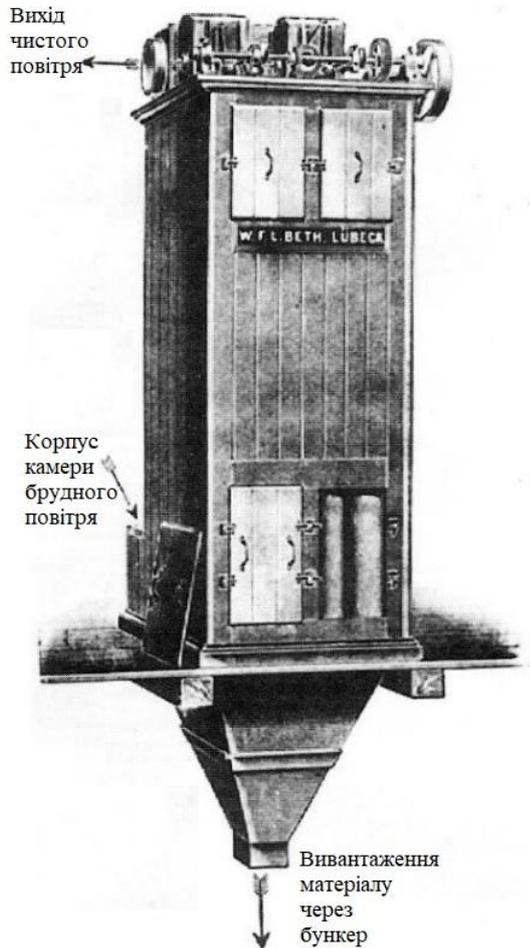


Рис. 1. Загальний вигляд пиловловлювача В. Бета, розробленого в 1920 році [5]

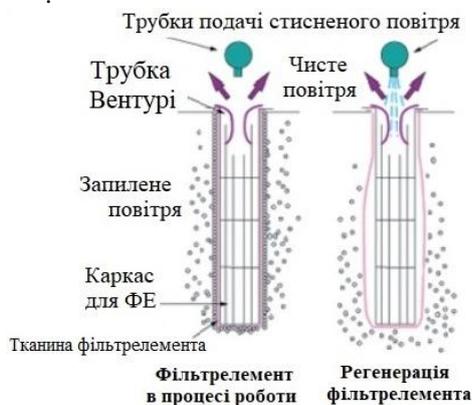


Рис. 2. Імпульсний спосіб регенерації [6]

На початку 1970-х було винайдено картриджні фільтри. Такі агрегати дозволяли виконувати більш тонку фільтрацію повітря (до 0,3 мікрметрів) та чудово справлялись з видаленням диму.

В цей же час починається активне використання фільтрів-тумановловлювачів (Рис. 3). Це обладнання фільтрувало краплі, що виділилися з туманів, розміром менше ніж 10 мкм, які утворилися внаслідок термічної конденсації парів, хімічної взаємодії газоподібних складових або під час тонкого диспергування рідин.

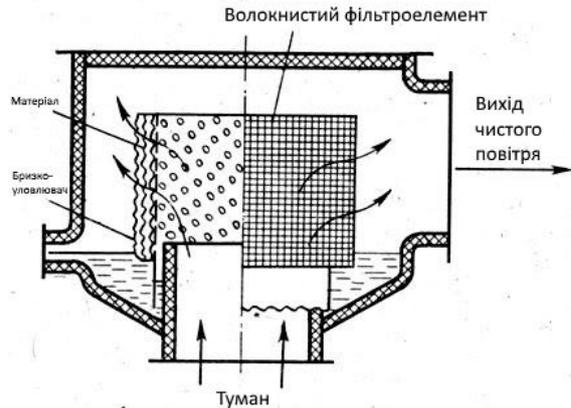


Рис. 3. Фільтр-тумановловлювач [7]

Як робочий елемент застосовують волокнисті картриджі, що споряджаються шарами зі скляних, синтетичних або металевих волокон. Відмінною рисою фільтрів-тумановловлювачів є коалесценція (злиття крапель рідини всередині іншої рідини або газу чи бульбашок газу всередині рідини за рахунок сил міжмолекулярного притягання) вловлених рідких частинок під час контакту з поверхнею волокон та утворення на них плівки рідини, яка видаляється в міру накопичення у вигляді цівко(тонких струменів) або великих крапель, що переміщуються усередині шару та з його тильного боку під дією сили тяжіння, захоплення газовим потоком і капілярних сил. Цікавою особливістю цього типу виробу є відсутність механічних впливів на шари, що фільтрують, тобто фільтри працюють із постійним опором у стаціонарному режимі саморегенерації (самоочищення) [8].

Окремим дієвим фільтраційним обладнанням стали електрофільтри. Ці пристрої були винайдені та впроваджені на початку 20-го століття, після того як Фредерік Коттрел отримав перший патент на електростатичний осаджувач, пристрій, який був розроблений для уловлювання сірчаноокислого туману і пилу в хімічній промисловості. З 1910 р. почалось масове використання електрофільтрів у металургії, електростанціях та машинобудуванні та постійне вдосконалення конструктиву. Принцип дії електрофільтру полягає у очищення газових потоків від твердих та рідких аерозольних частинок за допомогою електричного поля (Рис. 4).

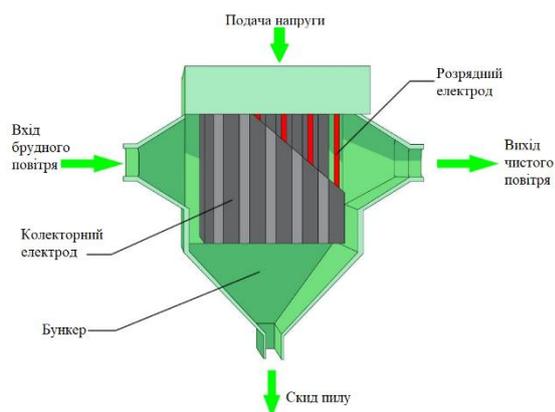


Рис. 4. Принцип роботи електрофільтра [9]

Газовий потік входить в корпус, після чого відбувається іонізація частинок пилу (в процесі проходження їх через колекторний електрод). Заряджені частинки осідають на електродах, після чого відбувається процес очистки (регенерації) завдяки механічним ударам чи вібрації. Пил потрапляє до бункера накопичення, а чисте повітря виходить в атмосферу чи до робочих зон. Основні недоліки електрофільтра у порівнянні з рукавними чи картриджними це:

- Більш висока вартість установки;
- Чутливість обладнання до зміни вологості та складу газу;
- Наявність постійного високовольтного живлення;
- Погана якість фільтрації дрібних частинок (менших ніж 0,01 мкм), диму, туману, діелектричних частинок тощо.

Разом з аспіраційним устаткуванням паралельно йшов активний розвиток вентиляційної ланки. Ще у 1836 р. Т. Тредгольд опублікував першу оцінку мінімальної кількості необхідного вентиляційного повітря. Він підрахував норму необхідного чистого повітря, виходячи з частоти дихання людини, щоб очистити легені від CO₂ [10]. Розвиток технологій сприяв появі нових технологій вентиляційних систем. Так, Бостонська компанія В. F. Sturtevant Co. у 1880-х роках розробила відцентровий вентилятор, що працював від парової машини, але він був найбільш корисний під час опалювального сезону, що додавало обмеження у його використанні [10]. Лише на початку 20-го століття, коли електроенергія стала загальнодоступною, промислові підприємства досягли бажаного рівня вентиляції. У 1906 році Вілліс Керріер винайшов перший пристрій для обробки повітря (Рис. 6). Це був перший у світі патент на обладнання для кондиціонування повітря, принцип роботи якого базувався на розпилюванні води як холодоагента у форсунковій зрошувальній камері [11].

В 1970-х роках починають поширюватись системи припливно-витяжної вентиляції, які дозволяли забезпечувати необхідну якість повітряного середовища

у робочому приміщенні. В наш час припливно-витяжні вентиляційні установки (Рис.5) використовуються майже на кожному підприємстві, в них додані функції рекуперації, що є незамінним енергозберігаючим елементом системи.



Рис. 5. Приклад припливно-витяжної установки

В наш час фільтрувальні системи продовжують неспинно розвиватись і для покращення ефективності їх роботи використовують наступні методи:

- Модернізацію системи регенерації (для аспіраційних агрегатів).
- Покращення матеріалу фільтроелементів.
- Покращення вибухобезпечності та пожежобезпечності фільтраційних систем.
- Використання систем автоматизації та аналізу системи.
- Рівномірний розподіл потоку повітря по каналах розподілу та всмоктування.

Модернізація системи регенерації

Незалежно від того, чи є фільтруючими елементами фільтрувальні картриджі або рукавні фільтроелементи, після певного періоду експлуатації фільтрувальна система буде створювати високий перепад тиску через накопичення частинок пилу на поверхні фільтрувальних матеріалів, що підвищує експлуатаційні витрати і послаблює її пропускну здатність. Тому регулярні операції з очищення мають важливе значення для підтримки хорошої продуктивності фільтрувальних систем. Через краще очищення робочих елементів, імпульсно-струминне очищення поступово замінило традиційне вібраційне і стало найбільш широко використовуваним методом регенерації. Імпульсний повітряний потік високого тиску, що розпилюється з сопла у верхній частині фільтруючого картриджа, проходить через трубку Вентурі і відокремлює накопичений пил (продукт) від фільтруючого матеріалу, до певної міри відновлюючи пропускну здатність. Тим не менш, процес регенерації майже завжди є неповним. Навіть після кількох послідовних імпульсно-струменевих очищень деякі частинки пилу неминуче залишаються

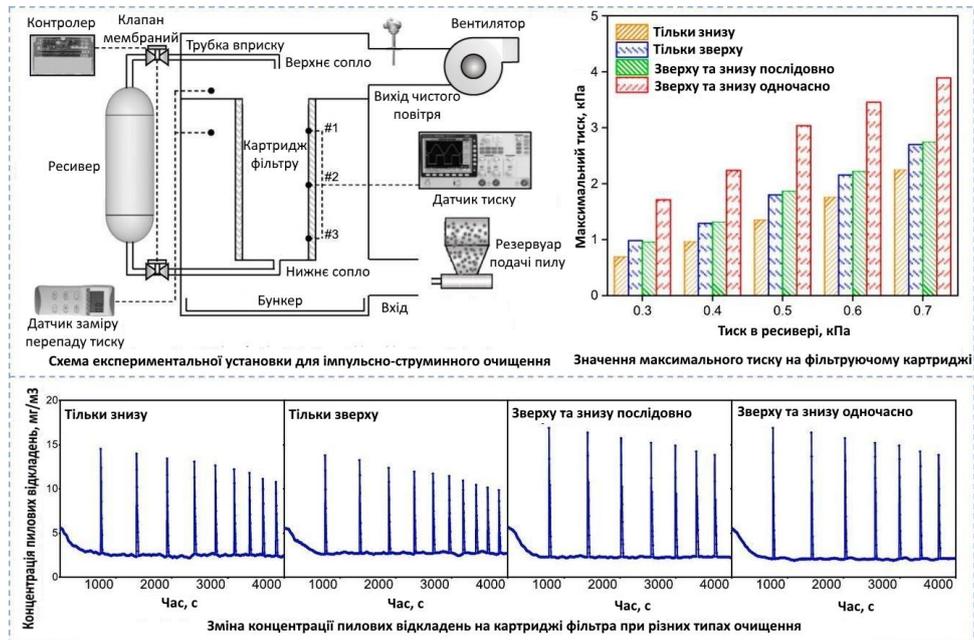


Рис.6. Дослідження очисного ефекту з використанням направлених струменів знизу та зверху фільтруючого елемента [12]

на тканому елементі. Це явище відоме як “плямисте очищення”, яке часто трапляється в середовищі з високою вологістю. Крім того, при роботі з липким або вологим пилом імпульсно-струменеве очищення може бути не в змозі ефективно видалити пиловий пиріг з фільтруючого матеріалу. Це пов'язано з тим, що липкий або вологий пил має сильну адгезію в порівнянні зі звичайним пилом через підвищену вологість або клейкі речовини, які виступають в якості сполучного сегмента. Вони можуть більш ефективно зв'язуватися з поверхнею фільтрувального матеріалу або з іншими частинками пилу.

Важливим дослідженням є покращення очисного ефекту у верхній частині фільтруючого картриджа (Рис. 6).

Оскільки в традиційному режимі очищення імпульсним струменем повітряний потік розпоршується вниз (від сопла, через трубку Вентурі і направлено до нижньої частини елемента), ефективність очищення верхньої частини фільтроелемента є низькою, так як верхня частина картриджа знаходиться близько до сопла, імпульсний струмінь ще не повністю розсіюється, і ефект струшування не є дієвим. Повітряний потік і кінетична енергія, що діють на верхню частину картриджа відносно слабкі, що призводить до недостатнього очищення і накопичення пилу. Це одна з основних проблем, з якою стикається фільтрувальний картридж у промисловому застосуванні. Щоб уникнути перевантаження елемента та його пошкодження, проводять аналіз значення миттєвого тиску на поверхню

картриджа фільтра, визначають показник зниження залишкового тиску після очищення та масу пилового осадка, що відокремився від картриджа фільтра. Також є пропозиція використання двох сопел трубок регенерації (одна відповідно для очищення верхньої частини, інша для направленої імпульсу до низу) – це дозволить здійснювати повне очищення тканини [12].

Для збільшення ефективності системи регенерації існує метод ступінчастого збільшення імпульсного тиску [13]. Було визначено, що використання постійного імпульсного тиску при вприскуванні негативно впливає на параметр перепаду тиску, і, відповідно, на ефективність регенерації в цілому. Збільшення імпульсного тиску виявилось більш сприятливим для видалення пилу, що осідає на фільтруючому середовищі. В результаті покращується ефективність регенерації, хоча підвищений імпульсний тиск і збільшив споживання електроенергії. На відміну від товстого шару пилу, утвореного на поверхні фільтра при постійному тиску очистки 0,3 МПа, пил в основному осідав усередині фільтруючого середовища при значеннях тиску в 0,5 і 0,7 МПа, а при поступовому збільшенні тиску (від 0,3 МПа до 0,7 МПа) ефективність очищення підвищилась, що відобразилося на подальшому подовженні терміну служби фільтра, збільшенні об'єму повітря для обробки та зменшенні концентрації викидів пилу з прийнятним споживанням енергії [13].

Для боротьби з проблемою налипанням продукту та неповним очищенням також запропоновано викори-

стовувати новий метод очистки фільтрувального елемента шляхом покриття фільтра частинками, які можуть зменшити силу зчеплення між шаром пилу та фільтрувальним матеріалом. Лабораторні експерименти підтвердили ефективність, показавши, що використання частинок може підвищити ефективність регенерації та зменшити залишкову масу пилу при імпульсно-струменевому очищенні. Крім того, польові випробування у вугільній шахті продемонстрували, що використання вищевказаних елементів може уповільнити зниження швидкості повітряного потоку в пиловловлювачі, дозволяючи підтримувати ефективність видалення пилу на високому рівні [14].

Покращення матеріалу фільтроелементів

Процес розробки фільтрувальних матеріалів дуже складний. Він включає випробування сировини і властивостей змішаних фільтрувальних матеріалів. Лабораторії, що проводять випробування сировини та розробку фільтрувальних матеріалів, часто оцінюють їх компоненти, використовуючи методи високоефективної рідинної хроматографії (HPLC), інфрачервоної спектроскопії з фур'є-перетворенням (FTIR), термогравіметричного аналізу – масової хроматографії – газової хроматографії та скануючої електронної мікроскопії (SEM). Ці методи допомагають забезпечити оптимальну конструкцію та використання тих матеріалів, які максимально відповідають конкретним умовам застосування [15].

Одним зі способів досягнути кращої ефективності фільтрувального елемента будь-якого класу – застосування комп'ютерного моделювання, що дозволяє прогнозувати значення міцності на розрив, жорсткість, проникність та безліч інших показників ефективності. Таке моделювання допомагає забезпечити повне розуміння потенційних фізичних властивостей фільтрувального матеріалу з певним складом до того, як подібний дослідний склад буде отримано в лабораторії. Коли склад виявляється багатообіцяючим, у лабораторії починають створюватися зразки, що дозволяють підтвердити передбачені властивості під час фізико-механічних випробувань.

Інше дієве рішення – це використання матеріалів з покриттям чи структурою, яка підходить до тих чи інших специфічних умов праці [16]. До прикладу, розділяють наступні особливості:

- Покращена поверхнева щільність – для високої ефективності в очищенні дуже дрібного чи абразивного пилу;

- Захист від займання – фільтраційні елементи виготовлені з технологією при якій матеріал не підтримує горіння;

- Антистатичні якості – матеріал, який особливо ефективний при роботі з липким, гіроскопічним чи агломеративним пилом, а також з вибухонебезпечним пилом;

- Високотемпературність – матеріал, який дозволяє працювати при температурах до +135°.

Покращення вибухобезпечності та пожежобезпеки фільтраційних систем

Системи фільтрації будуть накопичувати пил під час тривалої роботи (у накопичувальних бункерах, повітропроводах, колекторних система, тощо), а висока температура під час роботи може призвести до вибуху продукту. Тому, щоб запобігти виникненню аварій, необхідно виявити конкретний механізм вибуху всередині системи під час процесу роботи. Це має певне керівне значення для безпечного виробництва машинобудівних підприємств.

Тканні фільтроелементи є основним робочим інструментом при роботі систем транспортування двофазного потоку, він має великий вплив на потік і розподіл пилу всередині пневмоустановок та трубопроводах. У замкнутих просторах вибухонебезпечність накопиченого пилу відрізняється. Багато дослідників провели широкі дослідження вибухових характеристик пилу в замкнутих просторах і отримали цінні висновки [17]. Під час експерименту з використанням майже сферичного контейнера об'ємом 20 л і пристрою для вимірювання температури займання хмари пилу, було виявлено, що при подібній концентрації пилу розмір частинок збільшився з 42,89 мкм до 141,7 мкм, а мінімальна температура займання продукту зросла. Крім того, вони також виявили, що тиск вибуху та швидкість зростання тиску вибуху зменшуються зі збільшенням розміру частинок. Були проведені випробування на вибух алюмінієвого порошку в 5 л циліндричних контейнерах з вологістю навколишнього середовища 33 %, 60 % і 90 % відповідно. Вони повідомили, що коли концентрація алюмінієвого порошку була низькою, значення тиску P_{max} і dP/dt_{max} спочатку збільшувалися, а потім зменшувалися зі збільшенням вологості навколишнього середовища, і при високій концентрації алюмінієвого порошку, значення P_{max} і dP/dt_{max} очевидно збільшувалися зі збільшенням вологості навколишнього середовища. Інші випробування магнієвого порошку із різними розмірами частинок, використовуючи 20-літровий сферичний вибуховий пристрій, і показав, що інтенсивність вибуху була найбільшою в діапазоні концентрації пилу 1000–1500 г/м³, а інтенсивність вибуху магнієвого порошку з розміром частинок < 200 нм була нижчою, ніж мікронного порошку.

В [17] дослідники також виявили інгібуючу дію інертного газу на вибух алюмінієвого пилу розміром 5 мкм в закритій дерев'яній коробці та визначили, що вказана дія вуглекислого газу була кращою, ніж азоту. Вони також запропонували модель кінетичної енергії для динаміки поверхні горіння алюмінію, розкриваючи механізм гальмування на мікроскопічному рівні, а також чисельно змоделювали процес дифузії та вибуху алюмінієвого порошку в 20 л сферичному герметич-

ному контейнері та дослідили вплив турбулентності на характеристики вибуху алюмінієвого порошку з різними концентраціями. Їх результати показали, що рівномірність розподілу хмари пилу мала більший вплив на максимальний тиск вибуху, ніж інтенсивність турбулентності, а інтенсивність турбулентності мала більший вплив на швидкість зростання максимального тиску вибуху, ніж розподіл хмари пилу. Досліджуючи інгібуючу дію Al_2O_3 з різними розмірами частинок на вибух алюмінієвого пилу показали, що інертний ефект Al_2O_3 наномасштабу був кращим, ніж мікро- Al_2O_3 , і вибуху можна було запобігти, змішавши 40 % нано- Al_2O_3 з загальною масою. Завдяки великій кількості експериментальних досліджень було виявлено, що волога пригнічує поверхневу оксидну плівку алюмінієвого порошку та пригнічує її займання та горіння. Крім того, в діапазоні вмісту вологи 0–8 % агломерація частинок була основною причиною придушення вибуху, а збільшення вмісту вологи до 21% призвело б до розділення твердої компоненти та рідини, але алюмінієвий порошок у цьому стані все ще був вибухонебезпечним. Ці досліді дають загальне розуміння причин вибухонебезпечності пилу на прикладі вищевказаних матеріалів та показують вплив вологості на вибухоздатність твердої компоненти.

Щоб запобігти руйнівним наслідкам вибухів установок використовуються спеціальні мембрани (Рис. 7).



а



б

Рис. 7. Спеціальні мембрани: а – вибухова мембрана на фільтрі; б – приклад дії мембрани під час вибуху [18]

Ці деталі встановлюються на основні робочі секції фільтрувальних систем і мають певний тиск спрацювання. При виникненні вибуху в корпусі, вибухова хвиля виходить через шлях найменшого супротиву, а саме отвір мембрани. Через дію підвищеного тиску мембрана вилітає і через отвір йде вивільнення всієї енергії вибуху.

Руйнівний вплив всередині робочих камер може здійснити і пожежа. Так як основні елементи фільтрації вентиляції та аспірації мають тканеву структуру, вони дуже чутливі до іскор чи температурних чинників. Існують спецматеріали, які мають вогнетривку структуру, але якщо через будь-які чинники використання подібних елементів не є можливим, відбувається встановлення системи сухотрубу. Це розгалужений трубопровід, який входить в визначені точки секцій агрегату та при виникненні загрози пожежі по ньому йде подача води для тушіння вогню. На кінцях трубок встановлюються дренчери для ефективного розприскування, а для керування встановлюють датчики.

Використання систем автоматизації та аналізу системи

Оскільки технологія продовжує розвиватися, майбутнє в області фільтрації повітря відкриває захоплюючі можливості. Інтеграція з інтелектуальними пристроями та хмарними платформами може забезпечити дистанційний моніторинг і контроль систем пиловловлювання, дозволяючи операторам керувати своїми системами з безпрецедентною ефективністю та гнучкістю. Віддалений моніторинг може заздалегідь виявити потребу в технічному обслуговуванні або проблеми, які можуть зупинити виробництво, а саме небезпечні вибухи або пожежа [19].

Автоматика для аспіраційних та вентиляційних встановлюється для контролю параметрів повітряного середовища, температури потоку, контролю витрати електроенергії і забезпечення загальної безпеки. У випадку фільтрації двофазного потоку основним приладом є контролер. Цей пристрій дає змогу враховувати основні параметри роботи фільтру: тиск в системі, значення перепаду тиску для системи регенерації, температурні характеристики та відомості про стан фільтрувальних елементів.

Важливим елементом будь-якої аспіраційної установки є бункер накопичення.

Він використовується для тимчасового збору продукту та поступового вивантаження його через роторні клапани чи шнекові транспортери. Для забезпечення належних умов роботи накопичувача потрібний постійний контроль за об'ємом продукту, який знаходиться в ньому, адже при умові заповнення об'єму більш ніж на 2/3 пил починає здійматись разом з вхідним потоком, збільшуючи навантаження на тканні елементи, що призводить до їх руйнації чи швидкого зно-

шення. Для запобігання вищевказаних негативних факторів до конструкції можуть бути інтегровані ротаційні датчики та датчики рівня забруднення, які поєднуються з системою керування. Вони дозволяють здійснювати моніторинг роботи апаратів вивантаження та загального стану скупчення пилу, а також попереджають про виведення з ладу тих чи інших пристроїв. Якщо продукт має також агломератні властивості чи геометричні параметри бункера витримані не вірно (скіс стінок виконаний з кутом меншим 60° , це призводить до залягання продукту), то додатково до вищевказаних приладів, в бункер встановлюється локальна система автоматичного струшування зі стінок, а саме набір трубопроводів визначеного січення що інтегровані в усі бокові панелі і під'єднанні до подачі стисненого повітря та до контролера. Вказані трубки мають направлені сопла під кутом для вприскування, окрему систему клапанів і запрограмовану за часом "регенерацію" (Рис. 8). Схожу систему використовують для очищення бункерів силосів. Замість стисненого повітря використовують рідкий вуглекислий газ, який в балонах встановлюють на зовнішню стінку бункера, до балонів під'єднуються трубки, які з іншого боку соплами направлені на внутрішню стінку конструкції. В системі встановлений хімічний нагрівач, який після направлено впливу електричного заряду миттєво переводить зріджений вуглекислий газ у газоподібний стан. Цей фазовий перехід призводить до збільшення об'єму вуглекислого газу і підвищення тиску всередині трубки, а також подальшого вивільнення потоку через сопло в направлені накопиченого продукту [20].

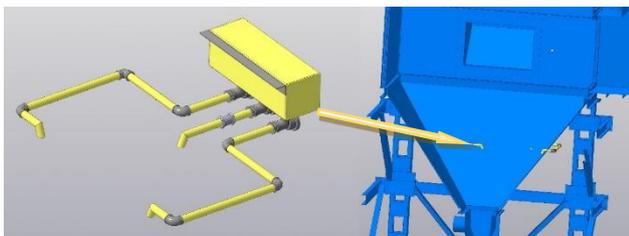


Рис. 8. Система пневмоочищення бункера

Підключення вищевказаних регенераційних компонент відбувається до поточної системи керування або до окремої, в залежності від функціоналу та можливостей апаратури.

У вирішенні задачі залягання пилу на стінках бункеру окрім очищення стисненим повітрям використовуються вібраційні очищувачі (Рис. 9). Принцип дії цих пристроїв полягає у передачі крутного моменту від електродвигуна на дебаланси, що створюють вібрації з частотою, яка відповідає обертанню валу електродвигуна. Установка девайсів відбувається на бокові стінки і завдяки вібраційному впливу пил "скочується" до живильників, які вивантажують його.

Додатково варто зазначити, що існує проблема накопичення та залежування пилу в системі трубопро-

водів до фільтрувального агрегату, а при окремих значеннях вологості та специфіки матеріалу може відбуватись утворення "корок" з продукту в трубах, що призводить до забивання і відповідно виходу з ладу окремої гілки чи взагалі системи загалом. Для уникнення негативних ефектів від залягання в труби можна вмонтувати спеціальні датчики для відслідковування параметрів тиску та накопичення, із з'єднанням їх до-основного контролеру, що дасть змогу завчасно та оперативно запобігти виникненню «корок» у системі.



Рис. 9. Типовий вібраційний пристрій очищення

Автоматика систем вентиляції дозволяє налаштувати та підтримувати задані параметри мікроклімату промислових приміщень. В залежності від функціоналу обладнання можна в ручному чи автоматичному режимі регулювати: витрата повітря, вологість повітря, температура повітря, перепади тиску тощо. Також системою керування можливо проводити ідентифікацію робочого стану будь-яких пристроїв системи, її моніторинг та завчасне визначення аварійності тих чи інших елементів. Виконавчі пристрої, завдяки яким відбувається контроль:

- Регулятори швидкості обертання вентиляторів;
- Регулятори потужності електронагрівачів;
- Електроприводи для повітряних клапанів (дроселі, шибєрні засувки)
- Датчики температури, вологості, тиску;
- Захисні елементи водяних та електричних нагрівачів;
- Перетворювач тиску, температури та вологості.

Щоб керувати всіма вищезазначеними апаратами, встановлюється панель керування, яка може бути обладнана контролером, базою релейних блоків чи системою дисперезації та віддаленого доступу. Останній функціонал має дуже великі перспективи, адже дозволяє здійснювати налаштування чи спостереження системи через додаток у смартфоні з будь-якої точки світу.

Одним з основних та дуже частих виконавчих пристроїв для регулювання потоку повітря є шибєрні засувки. Вони можуть функціонувати в ручному режимі чи бути автоматизовані завдяки електроприводу. Підбір габариту шибєра виконується в залежності від

розмірів трубопровода, в той час як привід підбирається за : площею клапана, за розміром валу, за напругою живлення привода, за наявністю додаткових функцій, тощо. Завдяки легкому конструктиву, клапан неважкий у використанні, але здатний регулювати об'єм використовуваного повітря.

Додатково шибери здатні забезпечувати рециркуляцію теплого повітря. Якщо машинобудівне підприємство, при роботі вентиляції, транспортує через трубопровід тепле повітря, в кінцевих ланках системи, вже за вентиляторам, встановлюються розгалуження труб на дві сторони з відповідним встановленням клапанів на кожну гілку. Одна з них заводиться до робочого приміщення, інша має вихід на вулицю. Відповідно до пори року, йде відкриття одного шибера (якщо це зима, то відкриваються гілку яка заходить в цех, до прикладу) і закриття іншого. Це дозволяє знизити витрати на опалення та покращити енерговитратні характеристики.

Загалом проблематика регенерації теплоти в вентиляції стоїть дуже гостро, так як серед енерговитратних галузей опалювально-вентиляційна техніка посідає одне з перших місць, тому у вирішенні проблеми раціонального використання енергоресурсів, утилізація теплоти повітря, що видаляється системами загальнообмінної, місцевої та технологічної вентиляції набуває особливо важливого значення. В якості утилізаторів теплоти в цих системах можуть використовуватись теплообмінні апарати різних типів: регенеративні, де теплообмінна поверхня поперемінно контактує з охолоджуваною і нагріваючою поверхнею; рекуперативні, де теплообмін між теплообмінними потоками відбувається через стінки; утилізатори контактного типу з проміжним теплоносієм [21]. Окремо, варто зазначити, що механічна регенерація та рециркуляція не має значення при неправильних розрахунках втрати теплоти.

Поділяють :

- Втрати через огорожувальні конструкції;
- Втрати через нагрів інфільтраційного повітря;
- Втрати на нагрів поступаючих матеріалів, транспорту;
- Втрати на нагрів холодного повітря.

У першому випадку необхідно враховувати характеристики розподіл температур повітря по висоті промислового цеху, параметри клімату місця знаходження заводу, характеристики теплопровідності огорожувальної конструкції. У другому випадку, має враховуватись інфільтрація – неорганізоване надходження в приміщення зовнішнього повітря через нещільності будівельних конструкцій (стіни, двері, вікна, ліхтарі) внаслідок різниці тиску повітря зовні й усередині будівлі. В третьому випадку необхідно враховувати кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання поступаючих однорідних матеріалів та транспортних засобів. Четвертий випадок працює для ситуацій відсутності повітря-

них завіс на відкритих пройомах чи воротах промислових будівель. При врахуванні всіх необхідних вищевказаних чинників, встановлення механічних та автоматизованих систем регулювання буде максимально ефективним.

В сучасних припливно-витяжних установках, найпоширенішим методом контролю температурних показників є встановлення рекуператора (Рис. 10). Це енергоощадний прилад з функцією децентралізованої вентиляції, очищення та підігріву повітря, що надходить з вулиці. Він складається з корпусу з двома ізолюваними один від одного порожнинами, якими здійснюється рух повітря в протилежних напрямках, та електричного реверсивного вентилятора.

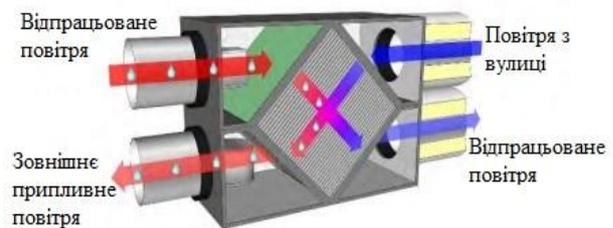


Рис. 10. Рекуператор [22]

До складу обладнання може бути включений додатковий нагрівальний елемент. Залежно від принципу дії, рекуператори бувають:

- Прямоточними;
- Перехресноточними;
- Протиточними.

При надмірній вологості повітря в систему встановлюються осушувачі повітря. Це автоматизоване кліматичне обладнання, основне завдання якого полягає у видаленні зайвої вологи з повітряного простору. Таким чином техніка знижує загальний рівень вологості на виробництві та надалі утримує показник суворо на рівні, рекомендованому для цієї галузі промисловості. Є два основні типи такого виду агрегатів:

- Конденсаційні;
- Адсорбційні.

Компресорний осушувач (Рис. 11) повітря працює за принципом конденсації, аналогічно принципу роботи холодильника. Усередині осушувача знаходиться компресійна холодильна машина, яка змушує циркулювати холодоагент по контуру між двома теплообмінниками-конденсатором і випарником, при цьому стан холодоагенту змінюється від рідкого до газоподібного. Під дією компресора і потім терморегулюючого вентиля холодоагент у цьому замкнутому контурі зазнає перепадів тиску, внаслідок чого фреон сильно нагрівається під час стиснення, проходячи через конденсатор, а проходячи через випарник, під час роз-

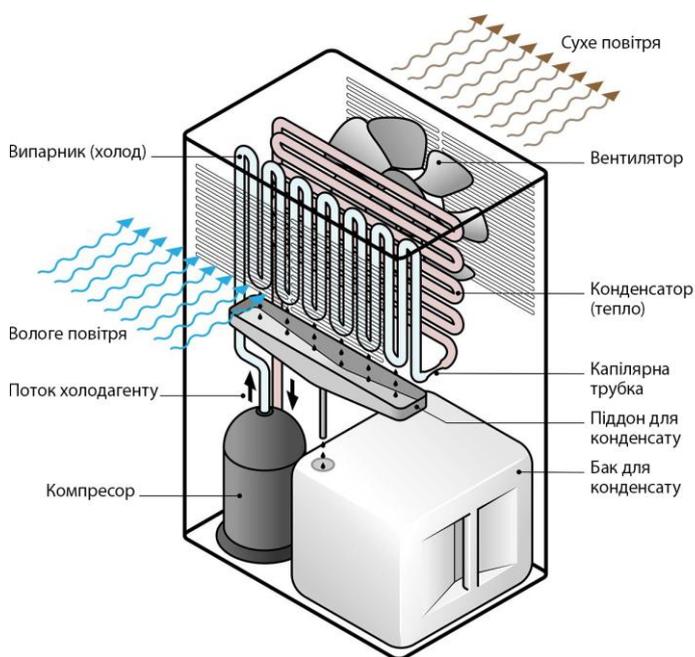


Рис. 11. Компресорний осушувач

ширення після вентиля різко охолоджується до температури, значно нижчої за температуру в приміщенні.

Адсорбційні осушувачі видаляють вологу з повітря за допомогою поглинання парів води високодисперсним матеріалом - адсорбентом, яким наповнений поворотний ротор. Він розміщений у корпусі осушувача разом із вентиляторами, приводом і електронагрівачем. У конструкції пристрою є 2 вентилятори, і кожен з них відіграє свою роль. Перший вентилятор втягує повітря з приміщення і направляє його до ротора з адсорбентом. Тут волога з повітряного потоку вбирається адсорбентом, а осушене повітря проходить далі і виходить назад у приміщення. Для того щоб адсорбційний ротор міг далі поглинати вологу, в окремий сектор регенерації адсорбційного ротора іншим вентилятором постійно подається нагріте ТЕНОм повітря. Волога, що виділяється з адсорбційного ротора, осідає у вигляді конденсату в секції конденсатора і стікає в контейнер, оскільки вологе повітря охолоджується потоком холодного припливного повітря. Регенераційне повітря потім знову подається на нагрівальний елемент для подальшого відновлення вологопоглинання сорбенту.

Рівномірний розподіл потоку повітря по каналах розподілу та всмоктування

Виділяють три способи рівномірного розподілу повітря по довжині повітропроводу через щілину, одне чи декілька отворів на його боковій поверхні:

1) Зміною висоти поздовжньої щілини чи площі отвору при постійному поперечному перерізі повітропроводу.

2) Зміною площі поперечного перерізу повітропроводу при незмінних розмірах щілини чи площі отвору.

3) Зміною співвідношення площі поздовжньої щілини чи площі отвору до площі поперечного перерізу повітропроводу.

В першому випадку рівномірний розподіл відбувається з різними швидкостями, в другому з однаковими швидкостями витоків з поздовжньої щілини та по всіх отворах, в третьому досягається лише наближеність до показників рівномірності [21].

Вищевказані розрахунки працюють для прямих повітропроводів та якісно можуть використовуватись для невеликих перерізів постійної роздачі повітряних мас. У випадку дискретної роздачі повітря, вищевказані розрахунки будуть невірні та можуть призвести до неефективної роботи обладнання.

Постановка задач майбутніх досліджень

На основі глибокого огляду еволюції фільтраційного обладнання: від циклонних пристроїв Фінча до сучасних картриджних фільтрів та електрофільтрів, можна констатувати, що ефективність сучасних фільтраційних систем значною мірою визначається не лише конструкцією установок, а й методами забезпечення регенерації фільтроелементів. Найбільш дієвим на сьогодні є імпульсно-струминний метод очистки, який при відповідній оптимізації (зокрема, двонаправлений подачі повітря та регульованому тиску) дозволяє суттєво подовжити термін служби фільтроелементів та покращити їх продуктивність. Використання інноваційних рішень, таких як захисні покриття на картриджах та покращені матеріали, знижують адгезію пилу та зменшують залишкові забруднення. Крім того, важливу роль відіграє автоматизація процесів, яка дає змогу точно контролювати стан потоку повітря (вологість, температуру, перепад тисків тощо) та вчасно реагувати на критичні зміни параметрів роботи пневмоагрегатів.

Як ми бачимо, сучасні системи дають можливість регулювати більшість характеристик вентиляції та аспірації, але гостро стоїть питання рівномірного розподілення потоків в розгалужених системах розподілу та збору повітря. Крім того, в більшості технологічних фільтраційних установок систем вентиляції та аспірації технологічний процес здійснюється обдуванням

або продуванням потоку газу через постійні робочі фільтрувальні елементи. До таких елементів належать: пучки труб, стрижнів або пластин, а також шарові або інші насадки, призначені для нагрівання або охолодження одного робочого середовища іншим; тканинні, волокнисті, сітчасті, зернисті та інші фільтрувальні перегородки тощо. Цілком очевидно, що у всіх випадках нерівномірний розподіл потоку по робочому перерізу або робочій (пористій) поверхні, а також по окремих фільтрах розгалужених колекторних систем може призводити до суттєвого погіршення технологічних показників установок порівняно з тими, які працюють за умов рівномірного протікання робочого середовища через усі фільтрувальні елементи. Якщо при нерівномірному розподілі потоків технологічні та енергетичні показники установок вдається підтримувати досить високими, то це означає, що розміри апарата порівняно з сумарним поперечним перерізом сукупності робочих елементів обрано із завеликим запасом. Виникає проблема можливості підвищення продуктивності, масогабаритних та екологічних показників досліджуваних систем при зменшених співвідношеннях зазначених розмірів установок, але з дотриманням рівномірності розподілу потоків.

Таким чином, забезпечення оптимального розподілу потоків у вентиляційних та аспіраційних установках передбачає правильні розрахунки геометричних співвідношень припливних і витяжних колекторних елементів, а також їх режимних параметрів роботи (витрати, швидкостей в окремих елементах, тиску у повітропроводах). При розгляді аспіраційних систем додатково до вищевказаних параметрів має бути врахований розподіл твердої компоненти по транспортуючому середовищу. Проте, варто зазначити, що при незначній концентрації пилу в струмінні рухомого газу (параметр концентрації $\leq 1,1$ кг/кг) та розмірах твердих частинок порядку 50 мкм, характер поля швидкостей буде однаковим як для запиленого, так і для незапиленого потоків [23].

Існує також складна аеродинамічна проблема осідання твердої фази в двокомпонентних потоках пневмотранспортних систем при певних режимних параметрах. Ця проблема потребує постановки багатьох експериментальних досліджень з використанням твердих частинок різної густини, особливостей злипання при різних температурах тощо в транспортуючих потоках.

Сучасний аеродинамічний розрахунок розгалужених вентиляційних та аспіраційних систем розподілу та збору повітря в переважній більшості випадків має дуже спрощений характер, тому що розміри колекторів та повітропроводів приймаються, головним чином, виходячи з рекомендованих величин швидкості

руху (які є сталими величинами, що виведені на основі економічних міркувань, а саме: оптимальні швидкості потоків мають відповідати мінімальним затратам на обладнання). На основі отриманих такими розрахунками перерізів каналів проводять подальший розрахунок фактичних величин швидкостей, втрат тиску тощо [24].

Висновки

У статті здійснено комплексний аналіз фільтраційного обладнання, що використовується в системах аспірації, вентиляції та пневмотранспорту. Окреслено сучасні підходи до підвищення ефективності фільтрації, зокрема шляхом удосконалення систем регенерації, автоматизації керування та застосування інноваційних матеріалів. Разом із цим залишаються не до кінця вивченими питання попередньої оцінки фізичних явищ, пов'язаних з особливостями динаміки потоків змінної маси, характерних для припливних та витяжних колекторних трубопроводів з урахуванням так званого «колекторного ефекту», особливо при дискретній зміні маси вздовж колекторів. Крім того, в системах активно не використовуються сучасні пристрої дистанційного керування, регулювання та контролю руху середовища (особливо у розподільчих вузлах збору/роздачі повітря), які можуть покращувати характеристики роботи пневматичних агрегатів (перевагу, як правило, надають застарілим елементам ручного керування). Для уникнення негативних наслідків недостатньо аргументованих методів розрахунку транспортування повітряного середовища, необхідно побудувати більш адекватну аналітичну модель аеродинамічних процесів дискретного розподілу потоків в вентиляційних та аспіраційних системах, а також розробити засоби автоматизації процесів керування розподілом потоків робочого середовища.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] I. T. Glebov, *Aspiration and transport pneumatic systems of woodworking enterprises: textbook*, Ekaterenburg: Ural. gos. leso-techn. un., 2004, pp. 9–11.

- [2] E. V. P. J. Manjula, W. K. H. Ariyaratne, C. Ratnayake and M. C. Melaen, “A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport,” *Powder Technology*, vol. 305, no. 2, pp. 782–793, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.026> .
- [3] J. M. Fingh. , “DUST COLLECTOR,” Sep. 01, 1885. [Online]. Accessed: Mar. 03, 2025. Available: <https://patents.google.com/patent/US325521A/en>
- [4] A. Hoffmann and L. Stein, “Gas Cyclones and Swirl Tubes,” Springer, 2008.
- [5] “History - R&R BETH,” R&R BETH, Aug. 26, 2024. [Online]. Accessed: Mar. 22, 2025 Available: <https://wordpress.r-r-beth.com/en/history/> .
- [6] Awadhesh, “Particulates: Selection of cleaning pulse pressure for pulse jet fabric filtration - Filtration and Separation,” *Filtration and Separation*, Aug. 27, 2013. [Online]. Accessed: Mar. 20, 2025. Available: <https://www.filtsep.com/content/features/particulates-selection-of-cleaning-pulse-pressure-for-pulse-jet-fabric-filtration>.
- [7] V. T. Medvedev, *Inzhenerna Ecologia*. Moskva: Gardariki, 2002, pp. 41–50.
- [8] M. I. Birger et al., *Spravochnik Po pyle- I zoloulavlivaniyu: 2-e Izdanie pererab. I Dop.* Energoatomizdatelstvo, 1983, pp. 162–163.
- [9] “Electrostatic Precipitators: Types, Advantages, Applications, and Air Pollution,” [Online]. Accessed: Jun. 02, 2025. Available: www.iqsdirectory.com. <https://www.iqsdirectory.com/articles/air-pollution-control/electrostatic-precipitators.html> .
- [10] J. Janssen, “The History of Ventilation and Temperature Control,” *ASHRAE Journal*, vol. 41, no. 10, Nov. 1999. Available: <https://www.ashrae.org/file%20library/about/mission%20and%20vision/ashrae%20and%20industry%20history/the-history-of-ventilation-and-temperature-control.pdf> .
- [11] W. H. Carrier, “APPARATUS FOR TREATING AIR,” Jan. 02, 1906 Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US808897A/en>
- [12] B. Xie, H. Li, S. Hu, and X. Zhang, “Experimental study of an improved pulse-jet cleaning method to enhance performance of cartridge dust collectors,” *Powder Technology*, vol. 442, p. 119874, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119874> .
- [13] Z. Yu et al., “A novel pulse-jet cleaning method to effectively extend the lifetime of pleated filter and reduce dust emission,” *Advanced Powder Technology*, vol. 35, no. 5, p. 104456, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104456> .
- [14] B. Xie, J. Pang, S. Hu, Z. Zhou, and H. Jin, “A new method to improve the pulse-jet cleaning performance of filter cartridges and its application to dust control in underground coal mines,” *Powder Technology*, vol. 405, p. 117528, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117528> .
- [15] F. Jianyong and Z. Jianchun, “Preparation and filtration property of hemp-based composite nonwoven,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 2, pp. 265–297, Apr. 2014, doi: <https://doi.org/10.1177/1528083714529807> .
- [16] M. Zhang et al., “An Environmentally Friendly Technology of Metal Fiber Bag Filter to Purify Dust-Laden Airflow,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 3, pp. 485–485, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13030485> .
- [17] X. Li, H. Chen, Y. Zhang, X. Zhang, and R. Li, “Research on law and mechanism of dust explosion in bag type dust collector,” *Advanced Powder Technology*, vol. 33, no. 6, p. 103619, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103619> .
- [18] “Combustible Dust | Dust Explosions | Nederman,” Nederman.com, 2025. [Online]. Accessed: Mar. 18, 2025. Available: <https://www.nederman.com/en-us/applications/combustible-dust> .
- [19] “A Brief History of Dust Collectors – Baghouse.com,” Baghouse.com, 2025. . [Online]. Accessed: Mar. 01, 2025. Available: <https://baghouse.com/a-brief-history-of-dust-collectors/> .
- [20] V. A. Shapovalov, V. I. Lyashenko, and A. O. Gurin, “A Cleaning of Internal Surfaces of Bunkers without the Presence of Operating Personnel inside the Bunker,” *Mining Revue*, vol. 30, no. 1, pp. 78–85, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.2478/minrv-2024-0009> .
- [21] O. Volkov, *Proektirovanie ventilyacii promyshlennyh zdaniy*, Kharkov: Vysshaya Shkola, 1989, pp. 195–204.
- [22] “Heat Recovery Ventilation Guide for Houses.” Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.bchousing.org/publications/Heat-Recovery-Ventilation-Guide-Houses.pdf>
- [23] I. Idelchik, *Aerodinamika Tehnologicheskikh Apparatov (podvod, Otvod I Raspredelenie Po Secheniyu apparatov): Monografiya*. Moskva: Mashinostroenie, 1983, pp. 314–318.
- [24] V. Bogoslovskij, *Otoplenie I ventilyaciya: ucheb. Posobie V 2-h ch.Ch.2. M*, 1976, pp. 170–171.

Filtration systems of aspiration, ventilation and pneumatic transport in industry: features of operation, aerodynamic problems and ways to solve them

Artur Kokolenko¹ • Volodymyr Turyk¹

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Abstracts. *The article considers filtration equipment used in aspiration, ventilation and pneumatic transportation systems at industrial enterprises. The key areas of its use are identified: air purification of the working environment, separation of gas and solid-phase components in the process of transportation of bulk materials, and ensuring the necessary air exchange in the premises. The historical stages of the development of filtration device designs are analyzed - from cyclones to modern cartridge, bag, electrostatic and mist filters. Considerable attention is paid to the aerodynamic features of work processes that affect the efficiency of the systems. The problems of uneven air distribution in branched air duct systems are considered in detail, which leads to a decrease in productivity, uneven load on filter elements, increased energy consumption and premature wear of equipment. Typical technical and automated solutions for equalizing the distribution of flows, improving the filter element regeneration system, and improving the explosion and fire safety of installations are considered. Modern technologies of materials science and computer modeling for the development of filter elements with improved properties are considered. The reasons for the formation of uneven air movement in collector systems are analyzed and the necessity of developing more accurate analytical models for predicting aerodynamics and improving the efficiency of filtration units in real industrial conditions is substantiated.*

Keywords: *aerodynamics of industrial machines; filtration; ventilation; aspiration; pneumatic transport; automatic control.*
