УДК 628.51+621.35
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/10

Кузнєцов С. І.
Херсонський національний технічний університет

Венгер О. О.
Херсонський національний технічний університет

Безпальченко В. М.
Херсонський національний технічний університет

Семенченко О. О.
Херсонський національний технічний університет

Івкіна Є. С.
Херсонський національний технічний університет

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ

Забруднення повітря є актуальною проблемою сучасності. У статті розглянуто методи та обладнання електричного очищення газів від пилу. Виявлено, що електричні фільтри найбільш ефективні завдяки здатності захоплювати пил розміром від 0,01 мкм до 100 мкм. Основними характеристиками пиловловлюючих пристроїв є: ефективність пиловловлювання, аеродинамічний опір і пиломісткість. З'ясовано, що ефективність пиловловлювання залежить від характеристик пилу, таких як: дисперсність, питома вага, початкова концентрація, вологість та заряд частинок пилу. Визначено, що надмірний опір призводить до порушення ефективної роботи вентиляційної системи, тому розробка та дослідження роботи електростатичного фільтра, що працює на принципі електризації фізичних тіл внаслідок трибоефекту, має значний практичний інтерес. Електростатичні фільтри не потребують джерела високої напруги, оскільки електричне поле виникає на поверхні електродів у результаті тертя двох різнорідних матеріалів. Визначено, що такі фільтри за умови правильного вибору та експлуатації в оптимальному технологічному режимі, перевершують усі відомі типи пристроїв для очищення газів від пилу за технічними показниками. Для високоефективного очищення повітря розроблено конструкцію електростатичного фільтра, здатного захоплювати дрібнодисперсний (аерозольний) пил будь-якого походження. Визначено математичні залежності для отримання оптимальних геометричних розмірів і пропорцій апарату. Проведено комплексні дослідження з підбору матеріалів, що легко електризуються, та вивчено вплив різних параметрів на процес утворення електростатичних зарядів. Досліджено ефективність розробленого електростатичного фільтра для очищення різних газів.

Ключові слова: *електростатичний фільтр, дрібнодисперсний пил, очищення повітря, заряд частинок пилу.*

Постановка проблеми. Сучасною екологічною проблемою є техногенне забруднення атмосферного повітря пилом, розміри якого варіюються в межах 0,01–100 мкм [1, с. 786]. У 2023 році кількість викидів речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в Україні склала 149 212,445, тонн [2]. У зв'язку з цим необхідно цілеспрямовано розробляти та впроваджувати нові методи та більш досконале пилоочищуване обладнання. Маючи різні фізичні та хімічні властивості пилові частинки, потрапляючи в організм людини, завдають шкоди його здоров'ю. Забруднення повітря дрібнодисперсними частинками стало причиною смертей 42 916 українців у 2019 році, 9 % випадків інфаркту міокарда [3]. Особливо шкідливі частки, що мають розмір менше 1–2 мкм, тому що вони при вдиханні затримуються у легенях. Для зниження забруднення повітря Кабінет Міністрів України розпорядженням від 08.11.2017 № 796-р схвалив Національний план скорочення викидів (НПСВ) забруднюючих речовин від великих спалювальних установок [4; 5, с. 296].

Очищення промислових газів від пилу перед надходженням їх в атмосферу запобігає забрудненню атмосферного повітря, дозволяє повернути у виробництво корисні речовини і утилізувати без шкоди для навколишнього середовища шкідливий і небезпечний пил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електричне очищення є найбільш ефективним серед відомих промислових методів очищення газів від пилу та туманів. У свою чергу електрофільтри – найбільш універсальне обладнання, призначене для уловлювання дрібної та аерозольної фракцій пилу. Конструкція електрофільтрів досить складна, вона складається з рядів коронуючих і осаджувальних електродів, розташованих в ізольованому корпусі [6, с. 182]. Для забезпечення роботи використовується високовольтне джерело постійного струму. Як показує практика, ККД електрофільтрів становить 92–96 % і чим він вище, тим більші габаритні розміри мають бути у обладнання. Відомі такі позитивні особливості електричного очищення газів:

1) можливість забезпечувати в залежності від конкретних умов і вимог ступінь очищення газів до 99.9 % і діапазон продуктивності – від декількох м^3/год. до мільйонів м^3/год.;

2) електрофільтри мають найменший гідравлічний опір серед всього відомого обладнання, призначеного для очищення газів;

3) можливість роботи при тисках нижче та вище атмосферного;

4) концентрація зважених частинок в газовому потоці, що очищається, від 0,1 мг/м^3 до 50 г/м^3 і більше;

5) температура при очищенні до 500°;

6) очищення може проводитись, як у сухому, так і в мокрому режимах;

7) електрофільтри здатні вловлювати частки від 0,01 мкм до 100 мкм;

8) електрофільтри можуть бути виготовлені з матеріалів стійких до кислот, лугів та інших агресивних середовищ;

9) процес очищення в електрофільтрах може бути повністю автоматизований;

10) витрата електроенергії електрофільтрів, як правило, менша, порівняно з апаратами інших типів;

11) термін служби електрофільтрів залежно від умов роботи, становить до 20 років.

Однак електрофільтри придатні не для будь-яких виробничих умов, а ефективність їх роботи залежить від режиму експлуатації [7, с. 3; 8, с. 624]. До недоліків електрофільтрів слід віднести їх високу вартість, громіздкість, складність виготовлення, а також необхідність періодичного відновлення їх фільтруючих властивостей. Крім того в електрофільтрах не можливо вловлювати частинки легкозаймистих матеріалів, через небезпеку їх загоряння або вибуху.

Незважаючи на це, слід підкреслити, що при правильному виборі електрофільтрів, експлуатації їх в оптимальному технологічному режимі в більшості випадків вони за всіма показниками перевершують газоочисні і пиловловлюючі апарати всіх відомих типів. Особливо високий ефект газоочищення досягається при поєднанні електрофільтрів з іншими апаратами газоочищення [9, с. 49; 10, с. 140].

Постановка завдання. Мета досліджень – розробка і дослідження роботи конструкції електростатичного пиловловлювача здатного ефективно вловлювати дрібнодисперсний пил будь-якого походження.

Виклад основного матеріалу. Конструкцію електрофільтрів конкретного призначення в основному визначають технологічні умови роботи: властивості і склад газів, які будуть очищуватись, зважених частинок, що містяться в ньому, температура, тиск і вологість газів, необхідний ступінь очищення та ін.

Принцип дії електрофільтрів ґрунтується на виділенні з газового потоку твердих або краплинних частинок шляхом впливу електричного поля на заряд, індукований на поверхні частинки. Частинка пилу заряджається при проходженні зони заряду і осідає на електроді протилежного знаку [11, с. 85]. Подальшими операціями є: механічне зняття пилу з електродів, транспортування його (зазвичай вільним падінням у бункері та регулярне видалення зібраного пилу з бункерів).

Особливе місце серед електрофільтрів займають електростатичні фільтри. Спосіб електростатичного очищення газів від пилу, заснований на електризації електродів шляхом трибоефекту. При цьому в результаті тертя електроди, які зроблені з діелектричних матеріалів, отримують заряд статистичної електрики. На відміну від динамічної електрики, статична електрика не може викликати появу тепла, магнітного поля або хімічної дії.

Основним законом статичної електрики є закон збереження електричних зарядів, які не знищуються і не з’являються знову, вони можуть по-різному розташовуватися на поверхні тіла в межах однієї молекули або групи молекул. Явище електризації тіла – чисто поверхневий ефект і заряди за певних умов можуть переходити з поверхні одного тіла на поверхню іншого. Поява електричного заряду супроводжується появою електричного поля – особливого стану простору, зумовленого присутністю у ньому заряду. Будь-яке поле має розподілену в просторі енергію.

До електричних полів застосовується принцип суперпозиції, який свідчить, що кожен заряд створює своє поле незалежно від поля інших зарядів і кожна точка поля характеризується певним потенціалом. Між двома точками існує перепад напруги. Потенціал є енергетичною характеристикою поля, він чисельно дорівнює роботі А, виконаної полем при переміщенні заряду q по силовій лінії поля в нескінченність. Про величину заряду, що виникає на поверхні тіла при його електризації, судять по напруженості поля. Напруженість електричного поля Е визначає величину сили, що діє на заряд, що знаходиться в стані покою. Напруженість сумарного поля у будь-якій його точці буде геометричною сумою напруженості векторів поля кожного заряду окремо.

$$E = \frac{u}{d}\left[\frac{b}{u}\right],$$

де: E – напруженість однорідного електричного поля, потенціал якого змінюється на 1 В на відстані 1 м вздовж силової лінії. Розмір заряду пропорційний потенціалу його поля:

$$g = CU,$$

де: C – коефіцієнт пропорційності (виражається ємністю тіла).

Чим більша ємність тіла (провідника), тим більший потрібен заряд, щоб потенціал тіла досяг необхідної величини. Взаємодія наелектризованих тіл визначається законом Кулона, який говорить що сила взаємодії двох точкових електричних зарядів q_1 і q_2 пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними: $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$.

У однорідному діелектричному середовищі відмінному від вакууму, сила взаємодії зарядів буде меншою. Це враховується введенням коефіцієнта $K = \frac{I}{\varepsilon_a}$ і закон Кулона може бути виражений наступною формулою:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon_a \cdot r^2},$$

де: ε_a – абсолютна діелектрична проникність середовища.

Поверхнева густина зарядів , тобто поверхневий розподіл зарядів у вигляді нескінченного тонкого шару є відношенням заряду q_1, який припадає на площу ΔS до її величини, коли $\Delta S \to 0$

$$\vartheta = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{\alpha_q}{\alpha_S}.$$

Елементарні заряди $\alpha_q = \vartheta \cdot \alpha_s$ можна розглядати як точкові заряди. Поверхнева густина зарядів – це деяке усереднене значення зарядів, віднесене відповідно до одиниці поверхні тіла, об'єму.

Для однорідного поля $\vartheta = \frac{q}{S}$. Однорідне електричне поле це таке поле, у всіх точках якого сила електричного поля залишається постійною. При наближенні до наелектризованого тіла ізольованого провідника на боці провідника, яка звернена до наелектризованого тіла, можна виявити заряди протилежного знаку, а з іншого боку провідника – заряди того самого знаку, як і у наелектризованому полі. При дотику двох різнорідних провідників на поверхні з'являються заряди, які дорівнюють за величиною і протилежні за знаком. У більшості випадків в основі електризації лежить контакт між двома тілами та його подальше порушення. У природних умовах контакт двох твердих тіл ускладняється наявністю на поверхні вологи, забруднень електролітами тощо.

В даний час найбільшого поширення набула теорія, що розглядає електризацію при контакті двох різних речовин, як результат переходу носіїв зарядів з однієї поверхні на іншу. Механізм процесу контактної електризації може протікати по-різному залежно від таких факторів, як електрохімічний процес, наявність сторонніх адсорбційних речовин на поверхні тіл, що перебувають у дотику, а також стану зовнішнього середовища.

Не менш обґрунтованою теорією є теорія, що розглядає електризацію, як результат орієнтації полярних молекул. Безперечний той факт, що виникнення електростатичного заряду є суто поверхневим ефектом. Електризація різних речовин в результаті тертя відбувається завдяки тому, що процес тертя зазвичай пояснюється взаємним зчепленням мікроскопічних виступів, що є на поверхні твердих тіл, і за рахунок міжмолекулярних сил.

Електростатичні процеси знайшли широке застосування у промисловості: очищення газів від твердих частинок в електростатичному полі, електростатичне забарвлення, електричне ворсування тощо. У всіх випадках зарядження частинок здійснюється в коронному розряді, а керування потоком заряджених частинок – штучно створеним електростатичним полем.

Електричні поля і заряди, утворені безпосередньо трибоелектричним ефектом не набули широкого застосування в промисловості, тому що недостатньо вивчені. Однак дослідження показують, що трибоелектричне зарядження матеріалу

може бути успішно використано в багатьох технологічних процесах. Величина електростатичного заряду в основному залежить від будови тіл, що знаходяться в контакті, стану поверхонь, від площі дотику тіл і від величини тиску одного на інше, а також швидкості відриву тіл одного від іншого.

Розроблено конструкцію багатодискового електростатичного пиловловлювача (рис. 1), який має велику продуктивність, високий ККД і низьку собівартість [12]. Для створення електричного поля у пиловловлювачі використовується трибоефект, який виникає внаслідок тертя діелектриків, і виключає необхідність у використанні високовольтного джерела живлення.

Матеріалом для виготовлення дисків можуть бути будь-які діелектрики. Дослідження показали, що найбільш придатними для цієї мети є полістирол, органічне скло, полівінілхлорид, склопластик, фтор-пласт і інші матеріали, що мають високу здатність наелектризовуватися від тертя. Щітки можуть бути виготовлені з повсті, капронової пряжі, скловолокна, щетини, сукна, хутра та інших матеріалів [13, с. 97].

При обертанні дисків і тертя їх об нерухомі щітки, на поверхні дисків виникає статична електрика, а між дисками – електростатичне поле. Частинки пилу примусово направляються або вільно надходять в апарат і потрапляють в електричне поле. Внаслідок ефекту поляризації і наведення зарядів, пил притягується поверхнею протилежно заряджених дисків, осідає на них і за допомогою щіток зчищається в бункер – пилозбірник.

Електростатичне поле створюється нерухомими в просторі і незмінними в часі електричними зарядами, які виникають в результаті трибоефекту, при цьому електричний струм відсутній.

Електростатичний розряд відбувається при дуже високій напрузі і дуже низькій силі струму. Напругу в десятки тисяч вольт при струмі, який вимірюється тисячними частками ампера неможливо відчути при дотику. Саме низьке значення струму не дає статичному заряду завдати людині шкоди, що є великою перевагою електростатичного пиловловлювача.

Для запобігання стікання наведених зарядів з поверхні дисків вал виконаний з діелектрика.

Електростатичний пиловловлювач складається із корпусу 1, встановленого на станині 2, який має вхідний патрубок 3 на одному боці і вихідний патрубок 4 – на протилежному, бункери для збору пилу 5, приєднані до нижньої частини корпусу 1, крім того, у корпусі 1 розміщені два паралельні вали з дисками-електродами 6, 7, які виконані із органічного скла і тефлону, до кожного диску-електроду 6, 7 з обох боків прилягає повстяна щітка 8 з пружиною 9, закріпленою на корпусі 1, та гумовий ніж 10, приєднаний до щітки 8 і призначений для очищення дисків-електродів 6, 7 від налиплого пилу, також пиловловлювач має розташований на станині 2 електродвигун 11 з клиноремінним приводом 12.

У електростатичному пиловловлювачі встановлено 5 дисків на кожному валу. Диски виготовлені з органічного скла і тефлону товщиною 5 мм і діаметром 250 мм. Відстань між дисками на валу 50 мм. Швидкість обертання дисків 77 хв$^{-1}$. Матеріал щіток – повсть. Для обертання ротора застосований двигун потужністю 30 Вт. При обертанні дисків-електродів 6 з органічного скла, вони заряджаються позитивно, а диски-електроди 7 з тефлону – негативно за рахунок тертя об повстяні

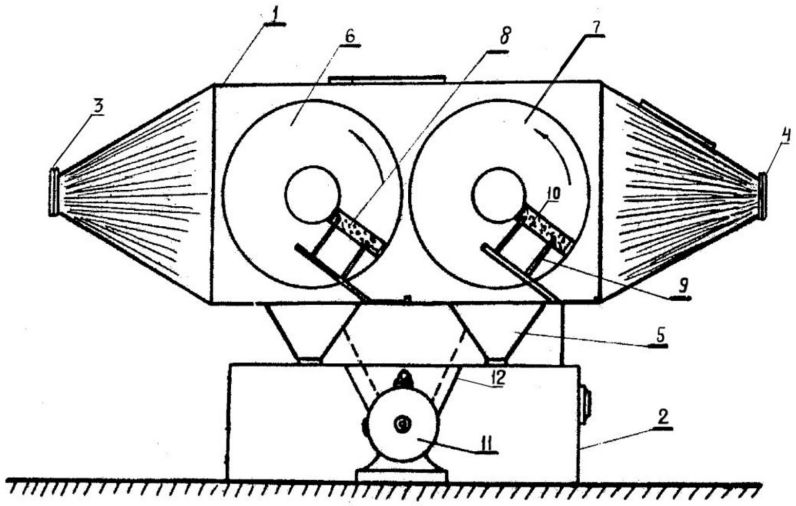

Рис. 1. Багатодисковий електростатичний фільтр: 1 – корпус, 2 – станина, 3, 4 – патрубки, 5 – бункер, 6, 7 – дискові електроди, 8 – щітка, 9 – пружина, 10 – ніж, 11 – електродвигун, 11 – клиноремінний привод

Таблиця 1

Результати випробувань електростатичного пиловловлювача при очищенні (100 м³) повітря від деяких домішок

	Пил (походження)	Запиленість повітря, г/м³		Ступінь очищення повітря, %
		вхід	вихід	
1	Цемент	1,5	0,013	99,8
2	Поварена сіль	2,3	0,01	99,6
3	Сечовина	3,2	0,01	99,8
4	Бавовняний пил	0,8	0,00	100,0
5	Суперфосфат	1,4	0,006	99,6
6	Аміачна селітра	2,8	0,006	96,8

щітки 8, які щільно притискаються до дисків-електродів 6, 7 за допомогою пружин 9, закріплених на корпусі 1. При терті виникає висока напруженість електростатичного поля. Частинки пилу, які мають різнойменні заряди, рухаються у газовому потоці та притягуються до протилежно заряджених дисків-електродів, осаджуючись на їх поверхні. Після чого пил зчищається з електродів за допомогою гумових ножів 10 у бункери для збору пилу 5.

Проведені випробування показали, що апарат описаної конструкції інтенсивно захоплює пил різних речовин органічного і неорганічного походження: вугільний пил, золу, цемент, сажу, натрій хлорид, хлористий калій, сульфіт і сульфат натрію, кварц, фосфорити, суперфосфат, гіпс, фосфорну муку, аміачну селітру, сульфат амонію, крейда, вапняк, луг і багато інших речовин. З органічних речовин добре уловлюється бавовняний, конопляний і джутовий пил, частинки інших текстильних волокнистих матеріалів, а також, борошна, цукру, щавлевої кислоти, сечовини, сульфосолі тощо. Результати випробувань електростатичного пиловловлювача при очищенні повітря від деяких домішок наведено в табл. 1.

Висновки. Електростатичний пиловловлювач здатний ефективно очищувати гази від надзвичайно легких і дрібних частинок, розмір яких може бути менше 0,01 мкм, безпечно вловлювати легкозаймистий, вибухонебезпечний, струмопровідний пил при низькому тиску газу. Робочі частини пиловловлювача не схильні до корозії при дії кислот, лугів та інших агресивних середовищ, оскільки виготовлені з неметалічних матеріалів. Пиловловлювачі не потребують джерела високої напруги.

Собівартість електростатичного пиловловлювача нижче, ніж у електрофільтру, конструкція апарату проста у виготовленні, довговічна, надійна, безпечна в роботі, не вимагає установки високовольтного джерела живлення, легка в обслуговуванні.

Список літератури:

1. Torghabeh A., Pradhan B., Jahandari A. Assessment of geochemical and sedimentological characteristics of atmospheric dust in Shiraz, southwest Iran. *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11, № 3. P. 783–792.

2. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів. Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів за регіонами у 2023 році С. 4. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm. (дата звернення: 23.03.2025).

3. Максим Сорока. Звітування про викиди в атмосферне повітря: як працює рішення для українських підприємств-забруднювачів. 04.03.2023. URL: https://rubryka.com/article/zvituvannya-pro-vykydy/ (дата звернення: 23.03.2025).

4. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 796-р. *Урядовий кур'єр*. 2017. 30 листопада. № 226.

5. Вольчин І. А., Гапонич Л. С. Стан та перспективи виконання національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XXII Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Київ, 2021 р.). Київ, 2021. С. 296–302.

6. Крусір Г. В., Мадані М. М., Гаркович О. Л. Техніка та технології очищення газових викидів: навч. посібник. Одеса : ОНАХТ, 2017. 207 с.

7. Ліпенков І. В. Аналіз сучасних систем очищення вихідних газів у суднових енергетичних установках. *Молодий вчений. Технічні науки*. 2020. № 1(77). С. 1-4. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-1

8. Gudanov I. S., Vatagin A. A., Lebedev A. E., Kapranova A. B., Dolgin D. S. Modernization of Diffuser Design of EGAV Type Electrostatic Precipitators for Ensuring Uniformity of Gas and Dust Flow. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2024. Vol. 60, № 9. P. 623–629. DOI: 10.1007/s10556-024-01260-6

9. Шапорев В. П. Екологія у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів: навч. посіб. Харків : Технологічний центр, 2018. 180 с.

10. Куц В. П., Гумницький Я. М., Марціяш О. М. Можливості застосування пиловловлювачів комбінованої дії на підприємствах переробної галузі регіону і економічна оцінка ефективності процесу пилоочищення. *Наукові праці ОНАХН*. 2016. Вип. 1. Т. 80, С. 138–143.

11. Zhao Z. Enhancing Dust Removal Efficiency in Electrostatic Precipitators with Homogeneous Flow. *Academic Journal of Science and Technology*. 2023. Vol. 7, № 3. P. 84–88. DOI: 10.54097/ajst.v7i3.13052

12. Трибоелектростатичний пиловловлювач: пат. на корисну модель № 120641 Україна: МПК A47L 9/10, (2006.01), B04C 3/04 (2006.01); заявл.22.04.17; опубл. 11.11.17. Бюл. № 21. 4 с.

13. Кузнєцов С. І., Венгер О. О., Семенченко О. О., Безпальченко В. М., Івкіна Є. С. Дослідження впливу деяких факторів на рівень електризації діелектриків. *Екологічні науки*. 2022. № 6(45). С. 95–99. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.15

Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina Ye. S.

ELECTROSTATIC FILTER FOR CLEANING GASES FROM DUST

Air pollution is a pressing problem of our time. The article considers methods and equipment for electrical purification of gases from dust. It was found that electrical filters are most effective due to their ability to capture dust with a size from 0.01 μm to 100 μm. The main characteristics of dust collection devices are: dust collection efficiency, aerodynamic resistance and dust capacity. It was found that the efficiency of dust collection depends on the characteristics of dust, such as dispersion, specific gravity, initial concentration, humidity and charge of dust particles. It was determined that excessive resistance leads to disruption of the effective operation of the ventilation system, therefore the development and study of the operation of an electrostatic filter that works on the principle of electrification of physical bodies due to the triboeffect is of significant practical interest. Electrostatic filters do not require a high voltage source, since an electric field arises on the surface of the electrodes as a result of friction of two dissimilar materials. It was determined that such filters, provided they are properly selected and operated in the optimal technological mode, surpass all known types of devices for cleaning gases from dust in terms of technical indicators. For highly efficient air purification, an electrostatic filter design was developed that is capable of capturing fine (aerosol) dust of any origin. Mathematical dependencies were determined to obtain optimal geometric dimensions and proportions of the device. Comprehensive studies were conducted on the selection of materials that are easily electrified, and the influence of various parameters on the process of electrostatic charge formation was studied. The effectiveness of the developed electrostatic filter for cleaning various gases was investigated.

Key words: *electrostatic filter, fine dust, air purification, charge of dust particles.*