

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕЯКИХ ФАКТОРІВ НА РІВЕНЬ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Кузнєцов С.І., Венгер О.О., Семенченко О.О., Безпальченко В.М., Івкіна Є.С.
Херсонський національний технічний університет
вул. Інститутська, 11, 29016, м. Хмельницький
ksieko1@gmail.com, super-elenavenger@ukr.net, Oksana.Semenchenko@gmail.com,
bezpalchenkov@ukr.net, liza_ivkina@ukr.net

Величезну небезпеку для організму людини при вдиху представляє повітря, у якому містяться тверді частинки розміром менш 10 мкм. Від більших частинок пилу допомагають захиститися верхні дихальні шляхи. Сьогодні сучасні системи пиловловлення можуть працювати з проектною ефективністю у вузькому діапазоні швидкостей, концентрацій і термодинамічних параметрів. Таким чином, у ряді випадків їх застосування стає малоефективним. Це стосується уловлення дрібнодисперсного пилу і пилу, що може злипатися, а також при недостатньому натиску газу, що очищується. Серед відомих методів очищення газів від рідких і твердих частинок електричний метод є найефективнішим, а електрофільтри – найбільш універсальними апаратами, що застосовуються у промисловості. Існують різні варіанти конструкцій електрофільтрів, одним з яких є трибоелектростатичний фільтр. Принцип очищення газів в ньому заснований на електризації електродів за допомогою тертя (трибоелекту), при цьому на поверхні діелектриків створюється статичний заряд. При обертанні дисків і терті їх об нерухомі щітки на поверхнях дисків виникає статична електрика, а між дисками – електростатичне поле. Частинки пилу, які примусово направляються або вільно надходять в апарат, потрапляють в електростатичне поле. Внаслідок ефекту поляризації і наведення зарядів частинки пилу притягуються поверхнею протилежно заряджених дисків. Вибір матеріалу діелектрика для осаджувальних електродів грає дуже важливе значення. Від нього залежать основні показники трибоелектростатичного пиловловлювача: ефективність пиловловлення, аеродинамічний опір, пилоємність апарату. Досліджували вплив різних чинників на ступінь електризації діелектриків. Вивчали природу матеріалу та швидкість обертання електродів, матеріал щіток, питомий тиск щіток на електроди, рівномірність розподілу зарядів на поверхні електродів. В процесі роботи визначено фактори, які впливають на створення електростатичного поля, досліджені властивості різних діелектриків, з яких можуть бути виготовлені електроди для трибоелектростатичного фільтра. *Ключові слова:* електростатичне поле, статична електрика, очищення газів від пилу.

Study of the influence of some factors on the degree of electrization of dielectrics. Kuznietsov S., Venher E., Semenchenko O., Bezpalchenko V., Ivkina E.

Air containing solid particles less than 10 microns in size poses a great danger to the human body when inhaled. It helps to protect the upper respiratory tract from coarser dust. Today, modern dust collection systems can work with design efficiency in a narrow range of speeds, concentrations and thermodynamic parameters. Thus, in some cases their use becomes ineffective. This applies to the capture of finely dispersed dust and dust that can stick together, as well as when the pressure of the gas being cleaned is insufficient. Among the known methods for cleaning gases from liquid and solid suspended particles, electric is the most effective, and electrostatic precipitators are the most universal of all devices used in industry. There are various designs of electrostatic precipitators, one of which is a triboelectrostatic filter. The principle of gas purification in it is based on the electrification of precipitation electrodes using friction (triboelectric effect), while a static charge is created on the surface of the dielectrics. When the disks rotate and rub them against fixed brushes, static electricity appears on the surface of the disks, and an electrostatic field arises between the disks. Dust particles forcedly guided or freely entering the apparatus enter the electric field, due to the effect of polarization and guidance of charges, they are attracted to the surface of oppositely charged disks. The choice of dielectric material for precipitation electrodes is of key importance. The main characteristics of the triboelectrostatic dust collector depend on it: the efficiency of dust collection, aerodynamic drag and dust absorption of the apparatus. In the work, the influence of various factors on the degree of electrification of dielectrics was investigated. We studied the influence of such parameters as the nature of the electrode material, the rotation speed of the electrode, the material of the brushes, the specific pressure of the brushes on the electrode, the uniform distribution of charges on the surface of the electrodes. In the process, the factors influencing the creation of an electrostatic field are determined, and the properties of various dielectrics from which electrodes for a triboelectrostatic filter can be made are investigated. *Key words:* electrostatic field, static electricity, dust cleaning of gases.

Постановка проблеми. Техногенне забруднення атмосферного повітря пилом є сучасною екологічною проблемою. Переважна більшість забруднюючих речовин утворюється при спалюванні органічного палива. Геогенний пил грає істотну роль у забрудненні повітря. Скануюча електронна мікроскопія показала, що розміри пилу варіюються в межах 0,8–50 мкм [1].

Актуальність досліджень. Верхні дихальні шляхи людини затримують частинки пилу розмірами

понад 10 мкм. Таким чином, основну небезпеку для організму людини становить пил фракцією менше 10 мкм [2, 3]. Тому проблемі уловлювання дрібнодисперсного пилу приділяється особлива увага.

Головними характеристиками пиловловлюючого обладнання є: ефективність, аеродинамічний опір та пилоємність [4, 5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує багато методів і типів обладнання для очищення газів від пилу [6]. Серед відомих способів

очищення газів – електричний найефективніший, а електрофільтри – найбільш універсальні апарати. Слід зазначити такі особливості електричного очищення газів:

1. Залежно від конкретних умов та вимог можна сконструювати електрофільтри зі ступенем очищення газів від пилу до 99,9%.

2. Електрофільтри мають найменший аеродинамічний опір у порівнянні з усіма типами існуючого пилоочисного обладнання.

3. Електрофільтри можуть експлуатуватися як при атмосферному тиску, так і при тисках набагато вище або нижче атмосферного.

4. Концентрація зважених частинок в газах, що очищаються, може коливатися в широких межах від 0,1 г/м³ до 50 г/м³.

5. Температура газу, що очищається, може бути як нижче нуля, так і більше, досягаючи 500 °С.

6. Очищення газів може бути як сухим, так і мокрим.

7. Електрофільтри спроможні вловлювати частинки розміром 0,01÷100 мкм.

8. Електрофільтри виготовляють із матеріалів стійких до кислот, лугів та інших агресивних середовищ.

9. Процес очищення газів в електрофільтрах може бути повністю автоматизований.

10. Питома витрата електроенергії на очищення газів зазвичай менша, ніж у газоочисних апаратів інших типів.

11. Термін служби електрофільтрів залежно від умов роботи становить від 5 до 20 років.

Однак, електрофільтри не здатні ефективно вловлювати дуже легкі і дрібні частинки [7]. Принцип дії електрофільтрів заснований на виділенні з газового потоку твердих або краплинних частинок шляхом впливу електричного поля на заряд, індукований на поверхні пилу, що уловлюється. Частинка набуває заряд в момент проходження через зону коронуючого заряду і осідає на електроді протилежного знака. Потім відбувається механічне зняття цього пилу з електродів. Спосіб електростатичного очищення газів від пилу включає електризацію осаджувальних елементів шляхом трибоелектричного ефекту. При цьому фільтруючі елементи отримують заряд статичної електрики, який перетікає на них в результаті тертя поверхні діелектричних матеріалів. При терті

двох різнорідних провідників на поверхні з'являються заряди, які рівні за величиною і протилежні за знаком.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Електростатичні поля і заряди, що утворені трибоелектричним ефектом, не широко використовуються в промисловості, головним чином тому, що вони недостатньо добре вивчені. Трибоелектричний ефект може бути успішно використаний для пилоочищення у багатьох технологічних процесах. Проаналізувавши методи та обладнання для тонкого очищення газів від пилу, можна констатувати, що найбільше цим цілям відповідають електричні фільтри. Водночас вони мають і недоліки: вимагають установки високовольтного джерела живлення, мають обмежене застосування при очищенні вибухонебезпечних газів, громіздкі та металомісткі.

Формулювання мети досліджень. Метою даної роботи є вивчення властивостей різних діелектриків як матеріалів для електродів, що є конструкційними елементами трибоелектростатичного фільтру [8].

Виклад основного матеріалу досліджень. В роботі досліджували вплив різних факторів на ступінь електризації діелектриків. Вивчали природу матеріалу та швидкість обертання електродів, матеріал щіток, питомий тиск щіток на електроди, рівномірність розподілу зарядів на поверхні електродів. Електроди виготовляли з різних матеріалів (табл. 1).

Методика досліджень полягала в тому, що електрод, виготовлений з діелектрика у вигляді плоского диска, закріплювався на валу та з двох боків притискався щітками. При обертанні валу на диску генерувалися електростатичні заряди, які вимірювали за допомогою приладу. Принцип роботи приладу заснований на тому, що заряд, що наводиться на вимірювальну пластину датчика, періодично змінюється при екрануванні пластини заземленим диском. Це створює на виході датчика змінний сигнал, який фіксується електронним приладом. Робота датчика базується на принципі електростатичного генератора. Заряд подається на вимірювальну пластину, поряд з якою розташований заземлений чотирьохпелюстковий диск. При його обертанні пелюстки вимірювальної пластини або відкриті для впливу на них зовнішнього поля, або екрановані від нього. В результаті заряд, що наводиться на вимірювальну

Таблиця 1

Властивості матеріалів електродів

Матеріал електродів	Щільність
Органічне скло (поліметилметакрилат) (C ₅ O ₂ H ₈) _n	1,18 г/см ³
Полістирол (C ₈ H ₈) _n	1,069÷1,125 г/см ³
Гетинакс (пресований папір, просочена фенол-формальдегідною смолою)	1,3÷1,4 г/см ³
Текстоліт (б/п ткани, просочена фенолформальдегідною смолою)	1,3÷1,45 г/см ³
Полівінілхлорид [-CH ₂ -CHCl-] _n	1,35÷1,43 г/см ³
Фторопласт (тефлон або політертафторетилен) (-C ₂ F ₄ -)	2,12÷2,2 г/см ³

пластину датчика зовнішнім полем, змінюється від максимального до мінімального значення і на виході датчика з'являється змінна напруга, яка подається на електронний підсилювач. Якщо вимірювальне поле має позитивний знак, величина поля, що діє на пластину датчика, буде збільшуватися, якщо негативний знак – зменшуватися. Робоча поверхня датчика розташовується з відривом 10 ± 1 мм від місця, де необхідно виміряти величину напруженості поля (рис. 1).

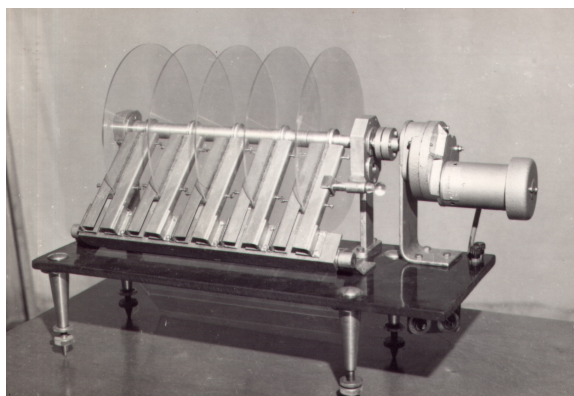


Рис. 1. Загальний вигляд стенду для випробування дисків

Вплив матеріалу дисків на напругу електростатичного поля. Досліджувалися диски товщиною $4 \div 6$ мм та діаметром $600 \div 700$ мм. Число обертів дисків змінювалося від 10 до 26 хв^{-1} , що відповідало окружній швидкості від 0,07 до 0,8 м/с. Кращі показники електризації мають диски з полістиролу, поліхлорвінілу та органічного скла. Гірше електризується гетинакс і не електризується текстоліт і фторопласт. При використанні щітки з повсті спостерігалася різна максимальна напруженість електростатичного поля (E) (табл. 2).

При електризації дисків повстяними щітками на дисках із полістиролу, поліхлорвінілу та гетинаксу генеруються заряди негативного знака, а з оргскла – позитивного знака. Слід зазначити порівняльну рівномірність розподілу зарядів на поверхні дисків. Величина напруженості електростатичного поля в центрі дисків та на периферії значно не відрізнялася.

Вплив матеріалу щіток на напруженість електростатичного поля. Для електризації дисків, виготовлених з полістиролу, поліхлорвінілу та органічного скла застосовували повстяні, фетрові та капронові щітки. При електризації дисків із полісти-

ролу при кількості обертів $n = 10 \text{ хв}^{-1}$ максимальна напруженість електростатичного поля спостерігається для пари полістирол-повість ($E =$ від -17500 до -18500 В/см). Дещо нижче для пари полістирол-фетр ($E =$ від -15500 до -16000 В/см). Мінімальна напруженість електростатичного поля відзначена для пари полістирол-капрон ($E =$ від -15000 до -15500 В/см). Аналогічна картина спостерігається при електризації диска з поліхлорвінілу. Максимальна величина напруженості електростатичного поля спостерігається при використанні повстяних щіток ($E = -15000 \text{ В/см}$), капронових ($E =$ від -9500 до -10000 В/см). Характерно, що в цьому випадку капронові щітки виявилися дещо ефективнішими за фетрові. При електризації диска, виготовленого з оргскла встановлено, що максимальна ступінь електризації також досягається повстяними щітками, при цьому величина напруженості електростатичного поля дорівнює $E = 10000 \text{ В/см}$. Органічне скло гірше електризує фетр ($E = +7000 \text{ В/см}$) і дуже слабо – капронові щітки ($E = +3750 \text{ В/см}$).

Зазначимо, що при електризації оргскла капроновими щітками на поверхні дисків генерується негативний заряд, тоді як при використанні щіток з повсті і фетру у цьому диску генерується позитивний заряд.

Максимальний заряд поверхні різних діелектриків генерується повстяними щітками, які переважно використовували при конструюванні електростатичних фільтрів. Це пояснюється більшою адгезією повстяних щіток до випробуваних матеріалів порівняно з фетром і капроном.

Вплив кількості обертів диска на напруженість електростатичного поля. Від швидкості обертання диска залежить час повторного дотику тих самих ділянок диска з щіткою. Якщо час повторного дотику зі щіткою більше часу повного розтікання зарядів у просторі, то напруженість електростатичного поля на різних ділянках диска буде неоднакова. Якщо ж цей час буде меншим, то заряди будуть рівномірно розподілятися по всьому диску.

Аналіз показав, що при електризації диска з органічного скла повстяними щітками при зміні кількості обертів диска від 10 до 26 хв^{-1} зміни напруженості поля не спостерігаються ($E = \text{const}$) і становить $+10000 \text{ В/см}$. При дослідженні пари оргскло-фетр зі швидкістю обертання диска нижче 16 хв^{-1} спостерігається деяке зниження напруженості електростатичного поля, а за $n > 16 \text{ хв}^{-1}$ напруженість

Таблиця 2

Залежність максимальної напруженості електростатичного поля (E) від матеріалу диску

Матеріал диску	$E, \text{В/см}$	Матеріал диску	$E, \text{В/см}$
органічне скло	+10000	гетинакс	-3000
текстоліт	0	поліхлорвініл	-15 000
фторопласт	0	полістирол	-18 750

електростатичного поля залишається без зміни. При випробуванні пари полівінілхлорид-фетр, напруженість електростатичного поля постійна (6250 В/см) і не залежить від кількості обертів диска. При випробуванні пари полівінілхлорид-повсть напруженість електростатичного поля при $n = 10 \div 16$ хв⁻¹ становить $E = -12500$ В/см. Середня величина напруженості електростатичного поля по всій поверхні диска практично не залежить від швидкості обертання диска.

Максимальна напруженість електростатичного поля досягається після двох-трьох обертів диска і якщо диск зупинити, то напруженість поля підтримується протягом двох-трьох хвилин, після чого починає поступово слабшати (якщо диск перебуває у стані спокою). При дослідженні диск протягом однієї хвилини піддається $10 \div 26$ кратної електризації тертям, внаслідок чого на його поверхні постійно підтримується максимальна напруженість електростатичного поля. Таким чином, швидкість обертання диска в межах $10 \div 26$ хв⁻¹ не впливає на напруженість електростатичного поля незалежно від того, з якого матеріалу виготовлено диск або щітки.

Вплив питомого тиску щіток на величину напруженості електростатичного поля. Питомий тиск щітки на диск змінювали шляхом регулювання зусилля пружини притисного пристрою та вимірювали за допомогою динамометра, який шарнірно прикріплювали до центру щітки, що відтягувалась від диска. Зусилля, при якому відбувався відрив щітки від диска, фіксували на шкалі динамометра. Питомий тиск щітки на диск розраховували шляхом поділу притисного зусилля до поверхні щітки. Дослідження проводили за постійної швидкості обертання диска $n = 16$ хв⁻¹. Досліджували диски з полівінілхлориду, текстоліту та органічного скла. Електризацію дисків проводили щітками, виготовленими з фетру. Притисне зусилля щіток до дисків змінювалося в межах від 30 г/см² до 66 г/см².

Аналізуючи вплив тиску щіток на напруженість електростатичного поля полівінілхлорид-фетр, спостерігали сталість величини напруженості поля $E = 10000$ В/см. Таким чином, зміна навантаження з 33 г/см² до 66 г/см² не призводить до зміни напруженості електростатичного поля.

Зі збільшенням навантаження на щітки до 66 г/см² напруженість електростатичного поля диска гетинаксу збільшується, але абсолютні значення напруженості при цьому невеликі. Невеликий вплив питомого тиску щіток спостерігали у пари органічного скла-фетр. Зі збільшенням притисного зусилля від 33 г/см² до 66 г/см² напруженість електростатичного поля цієї пари зменшується від 3750 В/см до 3000 В/см.

Таким чином, збільшення питомого тиску щіток призводить до незначного збільшення або зниження напруженості електростатичного поля. Для успішної електризації електродів достатньо зусилля притискання 30 г/см². Збільшення цього зусилля вдвічі до

66 г/см² не призводить до збільшення напруженості електростатичного поля. Зниження питомого тиску нижче 30 г/см² призводить до нерівномірного прилягання щітки до диска за довжиною щітки, що спричиняє нерівномірну електризацію диска.

Рівномірність розподілу зарядів на поверхні дисків. Завданням цієї серії дослідів було встановити, як розподіляються заряди на поверхні диска при терті. Датчик закріплювали на направляючих масштабної лінійки та переміщали вздовж радіусу диска з інтервалом 50 мм. Проводили дослідження для виявлення характеру розподілу зарядів на поверхні дисків. Використовували диски з поліхлорвінілу, а щітки з повсті, капрону та фетру. Дослідження показали, що для пари полівінілхлорид-повсть у центрі диска напруженість поля становила 14000 В/см, на відстані 12 мм від центру вона збільшилась до 15300 В/см, на відстані 220÷300 мм різко зменшувалась до 11000÷12000 В/см. Для пари полівінілхлорид-капрон спостерігали більш рівномірну напруженість поля по всій поверхні диска (9500÷10000 В/см). Для пари полівінілхлорид-фетр характер розподілу зарядів майже аналогічний парі полівінілхлорид-повсть.

Об'ємний розподіл зарядів у просторі. Встановлено, що під дією тертя діелектрика органічного походження і щітки на поверхні діелектрика генеруються заряди позитивного та негативного знака. Пил, потрапляючи у зону дії електростатичного поля, притягується до диска. Вивчали на яку відстань від поверхні диска поширюється дія електростатичного поля. Датчик приладу встановлювали на різну відстань від поверхні диска з інтервалом 100 мм. З відривом 100÷200 мм від поверхні диска спостерігали різке зниження напруженості електростатичного поля незалежно від обертів диска. При швидкості обертання диска 10 хв⁻¹ напруженість електростатичного поля на поверхні диска становить 8750 В/см, на відстані 100 мм від поверхні вона знижується до 7000 В/см, а на відстані 500 мм – до 1800 В/см. Майже повне зникнення електростатичного поля спостерігається на відстані 1400÷1500 мм від поверхні диска. Для швидкості обертання диска 12 хв⁻¹ та 16 хв⁻¹ спостерігали аналогічну залежність: спочатку різке зменшення напруженості поля на відстані 200÷300 мм, а потім повільне зменшення до нуля при відстані 1300÷1500 мм. Зона об'ємного впливу електростатичного поля досить велика, вона поширюється на відстань 1200÷1500 мм від поверхні диска. При відстані до 100 мм напруженість поля знижується на 20÷30%, при 200 мм – на 50÷60%, при 500 мм – на 70÷80%. Повне зникнення поля спостерігається на відстані 1300÷1800 мм від поверхні диска. Ефективна зона дії одного диска становить 200÷400 мм. При компонуванні відстань між дисками багатодискових електростатичних фільтрів має перевищувати 200÷400 мм.

Висновки. Максимальний заряд поверхні дисків з різних діелектриків генерується повстяними щіт-

ками. Це пояснюється більшою адгезією повстяних щіток порівняно з фетром і капроном. 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.

Література

1. Torghabeh A., Pradhan B., Jahandari A. Assessment of geochemical and sedimentological characteristics of atmospheric dust in Shiraz, southwest Iran. *Geoscience Frontiers*. 2019. P. 26–32.
2. Caplin A., Ghandehari M., Lim C., Glimcher P., Thurston G. Advancing environmental exposure assessment science to benefit society. *Nature Communications*. 2019. 10(1). № 1236. P. 124–128.
3. Малєєв В.О., Безпальченко В.М., Семенченко О.О. Атмосферне повітря м. Херсона: стан і проблеми. *Екологічні науки*. 2018. № 3(22). С. 47–52.
4. Karakoçak B., Patel S., Ravi N., Biswas P. Investigating the Effects of Stove Emissions on Ocular and Cancer Cells. *Scientific Reports*. 2019. 9(1), № 1870.
5. Карманов В.В., Кузнєцов С.І. Анализ пылеулавливающего оборудования льнозаводов. *Вісник ХНТУ*. 2017. № 2(61). С. 147–154.
6. Малєєв В.О., Кузнєцов С.І., Карманов В.В., Безпальченко В.М. Захист повітряного басейну від промислового пилу. *Наукові основи раціонального використання природно-ресурсного потенціалу Херсонської області : монографія*. Херсон, 2018. С. 235–280.
7. Hachicha A., Al-Sawafta I., Ben Hamadou D. Numerical and experimental investigations of dust effect on CSP performance under United Arab Emirates weather conditions *Renewable Energy* 143. 2019. P. 263–276.
8. Трибоелектростатичний пиловловлювач : пат. № 120641 Україна : МПК А47L 9/10, (2006.01), В04С 3/04 (2006.01); заявл. 22.04.2011; опубл. 11.11.1017, Бюл. № 21.