

© О.В. Золотько¹, О.Є. Золотько¹, Т.І. Русакова¹, Ю.В. Войтенко¹

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ

© O. Zolotko¹, O. Zolotko¹, T. Rusakova¹, Y. Voitenko¹

¹ Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF FACTORS THAT DETERMINE THE EFFICIENCY OF ELECTROSTATIC FILTERS

Мета. Визначити та ранжувати фактори, які впливають на ефективність роботи електрофільтрів, що застосовуються у процесах пиловловлювання у різних галузях промисловості.

Методика дослідження ґрунтується на застосуванні методів ретроспективного аналізу та експертних оцінок.

Результати дослідження. Дослідження показали, що в сучасних та перспективних технологіях металургії, цементного, хімічного виробництва й теплоенергетики для очистки викидів від пилу широко застосовують електрофільтри (ЕФ). Зниження їхньої проектної ефективності потребує модернізації або впровадження гібридних фільтрів. Альтернативою є виявлення й усунення причин недостатньої ефективності в процесі експлуатації. Виділено чинники фундаментального, технологічного та експлуатаційного характеру, які впливають на процес очистки. Проведено їх апріорне ранжування методом експертного аналізу. Отримані результати сприяють вирішенню проблем експлуатації ЕФ. Оптимізація їхніх параметрів з урахуванням властивостей пилу дозволяє підвищити ефективність роботи апаратів.

Наукова новизна. Проведено системну класифікацію факторів, що впливають на роботу електрофільтрів, із поділом на фундаментальні, механічні та експлуатаційні. На основі апріорного ранжування вперше кількісно встановлено пріоритетність впливу окремих чинників, серед яких провідну роль відіграють напруженість електричного поля, питомий електроопір пилу та ефективність системи струшування. Показано, що оптимізація цих параметрів може забезпечити підвищення ефективності пиловловлювання на 40–50% порівняно з неоптимальними режимами. Отримані результати уточнюють значущість технічних і експлуатаційних характеристик електрофільтрів та створюють підґрунтя для їх конструктивного і режимного вдосконалення з метою зниження запиленості повітря.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані у практиці експлуатації електрофільтрів у різних галузях промисловості при вирішенні проблеми підвищення ефективності роботи електрофільтра. Запропоновані заходи можуть знизити ризики для здоров'я працівників, підвищити рівень безпеки на робочих місцях, що забезпечить дотримання нормативних вимог щодо охорони та безпеки праці робітників.

Ключові слова: електрофільтр, промислові викиди, повітря робочої зони, галузі промисловості, ефективність очистки, фактори впливу, метод експертних оцінок.

Вступ. Основними напрямками боротьби із шкідливими викидами від стаціонарних джерел є вдосконалення технологічних процесів, використання ефективних газоочисних та пиловловлюючих апаратів, впровадження маловідходних та безвідходних технологій.

При розробці та впровадженні систем пиловловлювання перевагу віддають сухим методам очистки. При використанні мокрих методів очистки необхідно відчужувати значні території під шламові басейни.

Серед апаратів сухої очистки найбільш ефективним є електрофільтр (ЕФ), при оптимізації експлуатаційних характеристик якого вдається досягти високих показників ефективності очистки – 99,99 % [1]. Електрофільтр широко використовується у різних галузях промисловості: у теплоенергетиці за його допомогою очищують близько 60 % викидів, у виробництві сталі та цементній промисловості – близько 10 %, у кольоровій металургії – понад 7 %, у хімічній промисловості – порядку 6 % викидів, також цей апарат застосовують в системах очистки аспіраційного повітря робочих зон [1–2]. Слід зазначити, що підвищення ефективності пиловловлювання на 2–3 % може призвести до зниження остаточної запиленості газів у кілька разів, але вартість таких установок стрімко зростає при підвищенні ступеня очистки газів.

Сухі електрофільтри є найбільш зручними та ефективними апаратами для очистки невибухонебезпечних газів від пилу при температурах до 400⁰С, при великому діапазоні запиленості газу на вході в апарат – від 1 г/м³ до 50 г/м³, при полідисперсному складі пилу із значною кількістю дрібнодисперсних часток РМ_{0,5}, при широкому діапазоні витрат газу, що йде на очистку. При оптимізації параметрів процесу очистки викидів в ЕФ можна досягти залишкової концентрації пилу у кількості 5–15 мг/м³. Перевагами використання процесу електрофільтрації є помірне споживання електроенергії, що складає 0,1–0,5 кВт·год на очистку 1000 м³ газу і малий гідравлічний опір 150–200 Па [3–5]. Слід зазначити, що ЕФ порівняно нечутливі до порушень технологічного процесу та мають достатньо тривалий термін експлуатації 30–40 років при відповідному технічному обслуговуванні. Таким чином, поєднання високої ефективності, невеликих енерговитрат, можливості очищення великих потоків газів при високих температурах з вірогідним функціонуванням в агресивному середовищі обумовлюють можливість широкого використання електрофільтрів у промисловості [4].

В ЕФ створюють електростатичне поле для здійснення руху твердих часток у газоподібному потоці. Частки пилу набувають негативний заряд та рухаються до позитивно заряджених осаджувальних пластинчатих електродів. Отримавши позитивний заряд, тверді частки рухаються до коронуючого електроду та осаджуються на його поверхні. Осаджувальні електроди періодично регенерують струшуванням за допомогою вібраційних процесів або іншими методами. Періодичність струшування пилу оптимізують таким чином, щоб попередити вторинне винесення твердих часток, що негативно впливає на стан повітряного середовища робочих зон та здоров'я працівників. Вловлений пил скидається у пилові бункери, розташовані під осаджувальними пластинами [4].

Суттєвою відмінністю процесу електростатичного осадження частинок пилу з газових потоків від механічних методів сепарації є дія осаджувальної сили безпосередньо на тверді частинки, а не на газовий потік у цілому. Для більшості технологічних процесів визначити розрахунковим шляхом ефективність ЕФ можна лише орієнтовно. Похибки при прогнозуванні ефективності нових ЕФ на

підставі досвіду використання існуючих апаратів, які працюють у приблизно аналогічних умовах, є достатньо значними. Вибір оптимального типорозміру апаратів залежить від досвіду проєктантів та дослідників, отриманого ними у результаті здійснення практичної діяльності, а також від повноти та якості відповідних експериментальних досліджень [2–3].

Незважаючи на тривалий час використання ЕФ, дотепер розробляють нові методи впливу на властивості пилу та робочі характеристики процесів при електрофільтрації, які дозволяють підвищити ефективність процесу пиловловлювання. Запропоновано використання модернізації працюючих ЕФ або впровадження гібридних електрофільтрів, які поєднують ЕФ з тканинним рукавним фільтром [6–8], що є достатньо вартісним процесом. Тому врахування та оптимізація факторів, які впливають на ефективність роботи вже працюючих електрофільтрів у різних галузях є актуальним і важливим питанням.

Сучасний стан проблеми. Дослідження впливу параметрів процесу пилоочистки та властивостей вловлюваного пилу на ефективність роботи електрофільтрів, виконані вченими Алієвим Г.М.-А., Коузовим П.А., Страусом В., Юдашкіним М.Я., Ужовим В.Н., Залогіним Н.Г., Кізімом І.А., Решидовим І.К., Старком С.Б., стали основою створення довідників та підручників з пиловловлювання, на базі яких виділені групи факторів впливу. Розроблені також найкращі доступні технології в металургійному, цементному виробництвах, в яких виділено необхідність застосування електрофільтрів для очистки викидів, їх характеристик, переваг та недоліків [7–9].

Проаналізуємо основні технологічні схеми очистки газів з використанням ЕФ, які використовуються у виробничих процесах, з відомими характеристиками ефективності пиловловлювання та властивостями пилу.

Цементна промисловість: багатопільні ЕФ типу УГ та ЕГА використовують як другий ступінь вловлювання пилу, після пилоосаджувальної камери або циклону, за обертальними печами при мокрому та сухому способах виробництва цементу. Уловлювання дрібнодисперсного пилу здійснюється з ефективністю 75–80 %. Цементний пил є високоомним, питомий електроопір шару пилу досягає $\rho_{ш} \sim 10^{10}–10^{11}$ Ом·м), при сухому способі виробництва цементу він має низький вологовміст.

Агломераційне виробництво: сухі горизонтальні електрофільтри використовуються як другий ступінь (після батарейних циклонів) або як окремий апарат пиловловлювання для очистки викидів агломераційних газів від дрібнодисперсного пилу із $\rho_{ш} \sim 10^6$ Ом·м. Дослідження показують, що ефективність очистки була вищою при здійсненні одноступінчастої очистки і складала 95–96 %.

Мартенівське виробництво сталі: горизонтальні ЕФ використовують для очистки газів мартенівських печей ємністю 600–900 т від дрібнодисперсного середньоомного пилу після котлів – утилізаторів та попереднього допалювання чадного газу. При забезпеченні необхідної швидкості руху забрудненого повітря вдається досягти ефективності вловлювання пилу до 97 %.

Теплові електростанції: сухі горизонтальні електрофільтри типу УГ використовують для очищення викидів димових газів від дрібнодисперсної високоомної

золи ($\rho_{ш} \sim 10^9 - 10^{10}$ Ом·м). Можливість здійснення високоефективної очистки, що перевищує 98 % залежить від використаних на ТЕС методів впливу на електрофізичні властивості дисперсних часток.

З аналізу технологічних схем практичного використання ЕФ видно, що досягти проєктних високих показників ефективності очистки в реальних умовах експлуатації ЕФ достатньо складно.

Метою роботи є визначення факторів, які найбільше впливають на ефективність роботи електрофільтрів в різних галузях промисловості.

Основні задачі дослідження:

- аналіз джерел науково-технічної інформації з метою визначення можливих шляхів та способів керування процесом очищення промислових викидів з використанням електрофільтрів;
- аналіз чинників, які призводять до зниження ефективності роботи електрофільтрів;
- ранжування факторів впливу на ступінь очистки електрофільтрами промислових викидів методом експертних оцінок;
- формулювання висновків та практичних рекомендацій щодо можливості покращення характеристик ЕФ.

Основні результати дослідження. На базі проведеного аналізу усі фактори, які впливають на ступінь очистки газів у ЕФ, можна умовно розділити на три групи: фундаментальні, механічні та експлуатаційні [10–12].

До групи фундаментальних проблем відносять:

- високий питомий електричний опір шару пилу – суттєво впливає на час його розрядки. Високий питомий електроопір шару пилу ($\rho_{ш} \sim 10^{10}$ Ом·м) на осаджувальному електроді призводить до порушення електричного режиму роботи ЕФ, до виникнення сильного іскріння та потужного зворотного коронного розряду внаслідок електричного пробоя шару пилу на осаджувальному електроді при досягненні у ньому критичного значення напруженості електричного поля. Під час таких процесів відбувається різке зниження ефективності роботи ЕФ;
- вторинне пиловинесення: виникає при здійсненні очистки газів від часток низькоомного пилу ($\rho_{ш} < 10^4$ Ом·м). Такий пил швидко розряджається та відривається від поверхні осаджувального електрода і потрапляє повторно у газовий потік. Процес є суттєвим також при високих швидкостях руху газів в апараті та переповненні пилових бункерів. Слід зазначити, що при вловлюванні крупнодисперсного пилу з медіанним діаметром 20 мкм – 30 мкм вторинне пиловинесення призводить до аномально низької ефективності очистки в ЕФ;
- швидкість газів в активній зоні електрофільтру впливає на можливість рівномірного розподілу газу в апараті, час знаходження часток в активній зоні апарату, габаритні розміри, металоемність та вартість ЕФ. З підвищенням швидкості руху газів зростає турбулентність потоку, а ефективність роботи ЕФ знижується;
- температура газів: з її збільшенням знижується пробивна напруга, за якої виникає коронний розряд. Тому при високій температурі неможна підтримувати високу напруженість електричного поля, необхідну для зарядки та осадження часток пилу. Також температура газів суттєво впливає на динамічну в'язкість газів,

яка визначає опір руху заряджених часток на шляху до осаджувального електроду та на вологість пилу. При високих температурах зростає електроопір пилу, а зниження температури сприяє вирішенню проблеми виникнення зворотної корони при очищенні від високоомного пилу;

- концентрація та дисперсність часток пилу: при високих вхідних концентраціях їх об'ємний заряд впливає на характеристики коронного розряду, виникає явище запирання корони. За наявності у викидах дрібнодисперсного пилу запирання корони може виникати навіть при невисоких концентраціях пилу. При вмісті у викидах крупнодисперсного пилу ЕФ може працювати при більших його концентраціях;

- напруженість електричного поля відіграє значну роль у практиці електрогазоочистки. Початкова напруженість електричного поля, при якій виникає коронний розряд складає 15 кВ/см для повітря за нормальних умов. Критична напруженість електричного поля залежить від радіуса коронуючого електроду, з його зменшенням спостерігається більш раннє запалювання корони, тобто критична напруга у цьому випадку знаходиться в межах 20–30 кВ;

- загальна площа та форма електродів впливає на пилоємність осаджувального електроду, тобто масу пилу на його поверхні перед струшуванням, загальну площу поверхні осадження часток пилу, що дозволяє створити оптимальну товщину шару пилу перед її струшуванням;

- хімічний склад викиду, тобто склад газів, які присутні у викиді, що йде на очистку від пилу. Слід зазначити, що у газу, який очищується не повинний міститися окис вуглецю у зв'язку з його вибухонебезпечністю, також необхідний контроль вмісту сірчистого ангідриду;

- ефективність пристроїв для струшування пилу: частки пилу відриваються від електродів у вигляді достатньо крупних агрегатів. Недосконале струшування пилу призводить до зіткнення агрегатів між собою та електродами при падінні у бункер, агрегати руйнуються та захоплюються потоком газів. Оптимізація інтервалу струшування пилу призводить до зниження концентрації пилу у викидах у 2–3 рази.

До групи проблем механічного характеру можна віднести:

- погане юстування електродів;
- деформування осаджувальних електродів, що зменшує площу осадження часток пилу;
- рухомість (тремтіння або розгойдування), коронуючих дротів;
- забивання газоспрямовуючих лопатей або газорозподільної решітки пилом;
- потрапляння повітря у бункери із вловленим пилом;
- утворення скупчень пилу у вихідних та вхідних каналах.

Зрозуміло, що при своєчасному виявленні таких дефектів, проведенні планово-попереджувальних ремонтів вплив на зниження ефективності роботи електрофільтрів можна суттєво знизити.

Третя група проблем – проблеми експлуатаційного характеру. До основних з них відносять:

- відхилення при роботі в режимі пуску та зупинки;

- переповнювання бункерів уловленим пилом – призводить до вторинного забруднення повітря;
- перевантаження ЕФ надмірним потоком забрудненого газу;
- перевантаження ЕФ надмірною кількістю часток пилу;
- короткі замикання в коронуючих секціях (наприклад, при обриві дротів);
- погане регулювання випрямлячів електричного струму;
- порушення перебігу основних процесів в ЕФ.

Більшість проблем експлуатаційного характеру можна уникнути при дотриманні правил експлуатації устаткування, отриманих від виробників.

Як видно з аналізу, в цілому можна виділити близько 20 можливих причин зниження ефективності роботи електрофільтрів у порівнянні з проектними параметрами процесу очистки.

Апріорне ранжування факторів проведено у такій послідовності [12–13]: на підставі літературних даних складено список факторів, що впливають на ефективність пиловловлювання (серед факторів механічного та експлуатаційного характеру обрані найчастіше вказані у літературі): x_1 – питомий електроопір; x_2 – швидкість руху газів; x_3 – температура газів; x_4 – концентрація пилу; x_5 – дисперсність пилу; x_6 – загальна площа осаджувальних електродів; x_7 – перевантаження надмірним потоком газу; x_8 – порушення конструктивної цілісності внутрішніх елементів ЕФ; x_9 – переповнення бункерів пилом; x_{10} – напруженість електричного поля; x_{11} – хімічний склад викиду; x_{12} – вторинне пиловинесення; x_{13} – ефективність пристроїв для струшування пилу; x_{14} – проблеми електричного характеру.

Фахівцями з технологій пилоочищення, фактори розташовано у ряд за ступенем їхнього впливу. При цьому кожен фахівець мав можливість доповнити список факторів або здійснити зміну інтервалів варіювання. Внесок кожного фактору оцінювався за величиною рангу-місця, яке відводив фахівець даному фактору під час ранжування всіх факторів з урахуванням їхнього передбачуваного впливу. Фактору, якому приписують провідну роль, відведено перше місце, інші розташовані у порядку зменшення ступеня їхнього впливу на досліджуваний параметр. У випадку, коли однозначно визначити переважаючий вплив якогось фактору над іншим було складно, то їм присвоювали однакові ранги, які є середнім арифметичним з передбачуваної їхньої суми рангів. Результати опитування фахівців подано у вигляді матриці рангів (табл. 1).

Таблиця 1

Результати опитування експертів

Експерти	Фактори													
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
1	1	2	2	4	2	3	5	7	9	1	14	2	3	12
2	2	4	3	4	5	1	1	9	8	2	12	4	2	11
3	3	4	2	2	5	2	6	8	7	1	11	3	1	10
4	3	3	5	4	3	5	9	7	8	3	11	2	2	12

Ступінь узгодженості оцінок експертів визначається шляхом обчислення коефіцієнта конкордації Кендалла (W), що змінюється у межах від 0 до 1. Якщо значення коефіцієнта W суттєво відрізняється від нуля, тобто наближається до одиниці, висновки експертів вважаються добре узгодженими. На практиці значення $W > 0,5$ вже свідчить про те, то узгодженість експертної групи є об'єктивною. В іншому випадку результат вважається негативним, і проводиться аналіз причин неузгодженості експертних оцінок.

Рівень значущості та стійкості коефіцієнта конкордації визначається за допомогою критерію Пірсона – критерію χ^2 :

$$\chi^2 = W \times m \times (k - 1), \quad (1)$$

де: W – коефіцієнт конкордації; m – кількість фахівців, які приймали участь в опитуванні; k – кількість обраних для аналізу факторів.

Розрахункове значення χ^2 порівнюють з табличним, знайденим для прийнятого рівня значущості q і числа ступенів свободи $(k - 1)$.

Гіпотезу про наявність узгодженості оцінок фахівців приймається, якщо розрахункове значення критерію Пірсона є більшим табличного. Переконавшись в узгодженості думок фахівців, будується діаграма рангів, за допомогою якої оцінюється значущість факторів.

Метод апіорного ранжування дає можливість оцінити ступінь впливу різних чинників на ефективність очистки викидів в атмосферу і тим самим правильно відібрати значущі фактори для подальшого дослідження, обґрунтовано виключивши менш впливові фактори з подальшого розгляду.

Статистична обробка даних таблиці 1 проводиться у наступному порядку.

1. Визначається сума рангів по факторам:

$$R_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (2)$$

де: m – кількість експертів; ij – ранг i -го фактора, присвоєний j -м дослідником.

2. Відхилення D_i суми рангів від середньої суми рангів для кожного з факторів розраховується за формулою:

$$D_i = R_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (3)$$

де: D_i – відхилення суми рангів i -го фактора від середньої суми рангів; k – кількість факторів; $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}$ – середня сума рангів.

У даному випадку середня сума рангів для чотирнадцяти представлених чинників має значення:

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij} = 20,57.$$

3. Визначаються показники, груп пов'язаних між собою рангів:

$$g_{(n)j} = t_n^3 - t, \quad (4)$$

де: t – кількість однакових пов'язаних рангів у j – му ранжуванні; n – індекс величини однакових пов'язаних рангів у j – му ранжуванні.

4. Визначається сумарний показник пов'язаних рангів за ранжуванням:

$$T_j = \sum_{l=1}^p g_{(n)jl}, \quad (5)$$

де: p – кількість груп однакових пов'язаних рангів у j -му ранжуванні.

Результати розрахунку за пунктами 1–4 представлено у таблиці 2.

Таблиця 2

Статистична обробка результатів опитування

m		1	2	3	4	R	Δ	$(\Delta)^2$
Фактори	x_1	1	2	3	3	9	-10,8	116,3
	x_2	2	4	4	3	13	-6,79	46,05
	x_3	2	3	2	5	12	-7,79	60,62
	x_4	4	4	2	4	14	-5,79	33,47
	x_5	2	5	5	3	15	-4,79	22,90
	x_6	3	1	2	5	11	-8,79	77,19
	x_7	5	1	6	9	21	1,21	1,47
	x_8	7	9	8	7	31	11,21	125,76
	x_9	9	8	7	8	32	12,21	149,19
	x_{10}	1	2	1	3	7	-12,79	163,47
	x_{11}	14	12	11	11	48	28,21	796,05
	x_{12}	2	4	3	2	11	-8,79	77,19
	x_{13}	3	2	1	2	8	-11,79	138,90
	x_{14}	12	11	10	12	45	25,21	635,76

5. Розраховується значення коефіцієнта конкордації W :

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^k D_i^2}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (6)$$

У даному випадку:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^k D_i^2}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j} = 0,6897.$$

Установлено, що при $k = 14$ величина $W \cdot m \cdot (k - 1)$ підпорядковується χ^2 -розподілу. Розрахункове значення χ^2 порівнюється з табличним значенням з розподілу Пірсона. Гіпотеза про наявність узгодженості оцінок фахівців приймається, якщо $\chi_p^2 > \chi_{\tau}^2$ (де χ_p^2 – розрахункове значення критерію Пірсона; χ_{τ}^2 – табличне значення

критерію Пірсона). У даному випадку: $\chi_p^2 = W \cdot m \cdot (k - 1) = 0,6897 \cdot 4 \cdot (14 - 1) = 35,87$. За рівня значущості ($\alpha = 0,02$) та при числі ступенів вільності $(k - 1) = 13$ табличне значення χ_{τ}^2 становить 25,47.

Таким чином, можна вважати, що думки фахівців узгоджуються. Діаграму рангів показано на рисунку.

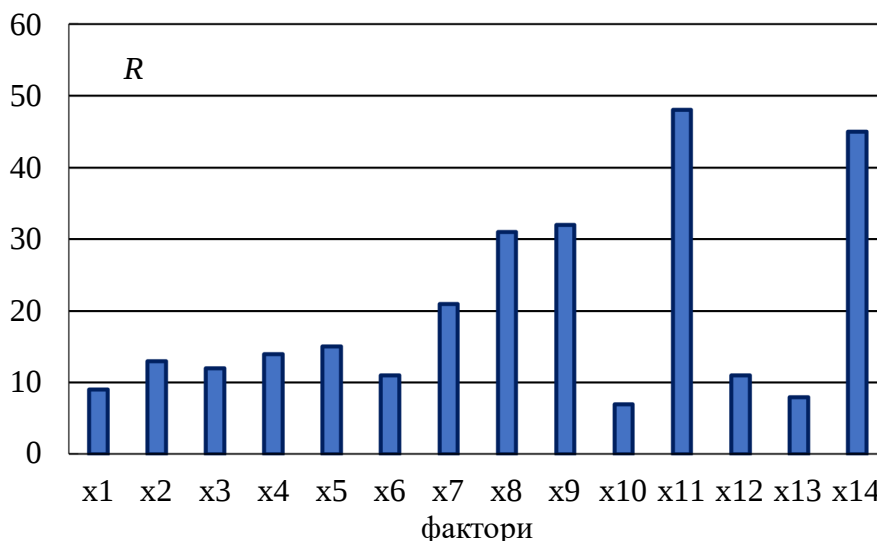


Рис. Априорна діаграма рангів

З наведеної діаграми (див. рис.) видно, що більше за інших на ефективність очистки викидів у ЕФ впливають такі фактори: x_{10} – напруженість електричного поля (сума рангів 7), x_{13} – ефективність пристроїв для струшування пилу (сума рангів 8) та x_1 – питомий електроопір (сума рангів 9). Рівнозначними за впливом (сума рангів 11) є фактори: x_6 – загальна площа осаджувальних електродів та x_{12} – вторинне пиловинесення, а близькими за значеннями є фактори: x_2 – швидкість руху газів і x_3 – температура газів (ранги 12 - 13), а також x_4 – концентрація пилу та x_5 – дисперсність пилу (суми рангів 14 та 15). Малозначущими факторами є: x_{11} – хімічний склад викиду (сума рангів 48) та x_{14} – проблеми електричного характеру (сума рангів 45).

Таким чином, для підвищення ефективності очистки від пилу у ЕФ слід у першу чергу звертати увагу на забезпечення стійкості його робочих характеристик та ефективності роботи систем струшування пилу [1, 10]. Необхідно також ураховувати високий питомий електроопір пилу та використовувати ефективні методи його зниження. Слід також зазначити, що швидкість газу та характеристики газу, а саме, температура, динамічна в'язкість – фактори впливу на ефективність роботи ЕФ, що широко використовуються при розрахунках електрофільтрів, але вони є менш значущими, ніж інші.

Висновки. Виконані дослідження дозволили отримати наступні висновки:

1. Високоєфективні електрофільтри широко використовують для очистки газових викидів в атмосферу від пилу у найкращих технологіях металургійної промисловості, теплоенергетиці, виробництві будівельних матеріалів, але експлуатаційні показники ефективності очистки часто не відповідають проєктним.

2. Більша ефективність у порівнянні з електрофільтрами притаманна гібридним ЕФ, але їх впровадження потребує модернізації існуючих ЕФ або їх демонтажу та заміни новими апаратами. Більш простим та менш коштовним варіантом підвищення степені очистки газів в ЕФ є рішення проблем, пов'язаних з подоланням причин зниження їх ефективності.

3. Аналіз досвіду експлуатації електрофільтрів показав, що усі фактори, пов'язані зі зниженням ефективності очистки від пилу, можна розділити на чинники фундаментального, технологічного та експлуатаційного характеру.

4. Виконано апріорне ранжування факторів зниження ефективності методом експертного аналізу. Врахування отриманих результатів, а саме сум рангів по кожному з факторів, дозволяє послідовно вирішувати проблеми експлуатації ЕФ.

5. Екологічна безпека територій та якість повітря робочої зони залежить від впровадження ефективного очисного устаткування, до якого і належить застосування ЕФ, що забезпечує безпечність праці та екологічну стабільність в роботі промислових підприємств. Оптимізація параметрів роботи електрофільтрів та застосування методів впливу на властивості пилу дозволить зробити використання цих апаратів максимально ефективним і надійним.

Перелік посилань

1. Електрофільтр. (n.d.). <https://www.em-eco.net.ua/products/jelektrofiltr/>
2. Електрофільтри (n.d.). <https://7-vz.com.ua/category/elektrofiltry/>
3. Електрофільтри (n.d.). <https://bmzprogress.com/catalog/pilo-gazo-siroochishchennya/electrostatic-precipitators/electrostatic-precipitators>
4. Крусір, Г., Мадані, М., & Гаркович, О. (2017). *Техніка та технології очищення газових викидів. Навчальний посібник*. ОНАХТ-Одеса. <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c25eec0b-557e-4966-8714-b3eeda960062/content>.
5. Кузнєцов, С., Венгер, О., Семенченко, О., Безпальченко, В., & Івкіна, Є. (2021). Дослідження впливу деяких факторів на рівень електризації діелектриків. *Екологічні науки*, 6(45), 95–99. <https://scispace.com/pdf/study-of-the-influence-of-some-factors-on-the-degree-of-2iwb4zia.pdf>
6. Gudanov, I. S., Lebedev, A. E., & Vatagin, A. A. (2022). Modernization of a High-Performance Electrostatic Precipitator. *Chemical and Petroleum Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01031-1>
7. Jaworek, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., Marchewicz, A., Czech, T., & Śliwiński, L. (2019). Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review. *Separation and Purification Technology*, 213, 283–302. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.011>
8. Jaworek, A., Marchewicz, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., & Czech, T. (2017). Two-stage electrostatic precipitator with dual-corona particle precharger for PM 2.5 particles removal. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1645–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.032>
9. Ремус, Р., Монсоне, А., Рудьє, С., & Санчо, Л. (2013). *Найкращі доступні технології та методи управління (НДТМ) Довідковий документ для виробництва чавуну та сталі* (Директива 2010/75/ЄС «Про промислове забруднення (інтегроване запобігання та контроль забруднення)»). Відділ публікацій Європейського Союзу.
10. Шорхт, Ф., Коурті, І., Скалет, Б., Рудьє, С., & Санчо, Л. (2013). *Довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) для виробництва цементу, вапна та оксиду магнію* (Директива щодо промислових викидів 2010/75/EU (Комплексне запобігання та контроль забруднень)). Центр публікацій Європейського Союзу.

11. Білони́к, І., Капустя́н, О., Берегове́нко, М., Білони́к, Д., Шуми́кін, С., & Губа́рь, Є. (2021). Дослі́дження властиво́стей молотків ме́ханізму стру́шування е́лектрофі́льтрів, ви́готовле́них е́лектрошла́ковим на́плавленн́ям у́дарної ча́стини. *Ві́сник При́азовського держа́вного те́хнічного уні́верситету. Сери́я: Те́хнічні нау́ки.*, (43), 41–47.
12. Яро́щук, Л. Д. (2022). *Експертні методи в автоматизованих системах керування: Формування та напрями використання експертних знань: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*. КІП ім. Ігоря Сікорського.
13. Башинська, І. О. (2015). Використання методу експертних оцінок в економічних розрахунках. *Актуальні проблеми економіки*, 7 (169), 408–412.

ABSTRACT

Purpose. To identify and rank the factors that affect the efficiency of electrostatic precipitators used in dust collection processes in various industries.

Research methodology is based on the application of retrospective analysis methods and expert assessments.

Research results. The study demonstrated that in modern and emerging technologies of metallurgy, cement, chemical industries, and thermal power generation, electrostatic precipitators (ESPs) are widely used for dust emission control. A decrease in their designed efficiency requires either modernization or the implementation of advanced hybrid filtration systems. An alternative approach involves identifying and eliminating the causes of reduced efficiency during operation. Factors of a fundamental, technological, and operational nature that influence the filtration process were identified, and their a priori ranking was conducted using expert analysis. The obtained results facilitate a systematic approach to solving problems related to ESP operation. Optimization of their operational parameters, taking into account the physicochemical properties of dust, enables improved filtration efficiency.

Scientific novelty. A systematic classification of factors affecting the performance of electrostatic precipitators has been carried out, grouping them into fundamental, mechanical, and operational categories. Based on a priori ranking, the priority impact of individual factors was quantitatively established for the first time. The leading role is played by the electric field intensity, the specific electrical resistivity of dust, and the effectiveness of the rapping system. It was shown that optimizing these parameters can increase dust collection efficiency by 40–50% compared to non-optimized operating conditions. The results clarify the significance of technical and operational characteristics of ESPs and provide a foundation for their design and operational improvement aimed at reducing air dust pollution.

Practical significance. The results of the study can be used in the practice of operating electrostatic precipitators in various industries when solving the problem of increasing the efficiency of electrostatic precipitators. The proposed measures can reduce risks to the health of workers, increase the level of safety in the workplace, which will ensure compliance with regulatory requirements for the protection and safety of workers.

Keywords: *electrostatic precipitator, industrial emissions, working area air, industries, cleaning efficiency, influence factors, expert assessment method.*