

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 662.965: 697.946

В. П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ЗОЛООЧИЩЕННЯ

Розглянуто і проаналізовано фактори, що впливають на процес електростатичного очищення димових газів від леткої золи. Отримано визначальні критерії процесу, за якими методом планування екстремальних експериментів виконано пошук оптимальних показників уловлювання золових частинок електрофільтром. Встановлено області величин визначальних критеріїв, в яких забезпечуються оптимальні режими процесу електростатичного золоочищення.

Ключові слова: зола, електрофільтр, визначальний критерій, факторний простір, оптимізація.

З промисловими викидами від різних джерел в атмосферу щорічно надходить близько 250 млн т пилю, більше 200 млн т оксиду вуглецю, близько 150 млн т двооксиду сірки та 120 млн т оксидів азоту. Типова ТЕС потужністю 1000 МВт спалює за рік більше ніж 3 млн т вугілля і викидає у атмосферу, крім низки інших речовин, близько 30 тис. т золи. Летка зола вугільних ТЕС має токсичні елементи, що призводить до довготривалого забруднення оточуючого середовища.

Електростатичне очищення димових газів є основним методом уловлювання частинок золи на теплових електростанціях. Такий метод є достатньо універсальним, придатним для багатьох дисперсних систем, в широкому діапазоні розмірів частинок. Електрофільтрами оснащено близько 62% пиловугільних ТЕС України.

Газоочисне устаткування теплових електростанцій України, встановлене у 60–70-х роках ХХ ст., після багатьох років експлуатації працює не в оптимальних режимах, і не дозволяє задовольнити сучасні екологічні вимоги щодо охорони оточуючого середовища. Тому пошук оптимальних умов проведення процесу очистки димових газів енергетичних котлів від

завислих частинок (леткої золи, продуктів недопалу і т. ін.) є важливою екологічною задачею.

Оптимальні режими будь-якого процесу можна визначити шляхом проведення експериментальних чи аналітичних досліджень. Але в багатьох випадках адекватне аналітичне дослідження технічного об'єкта виконати неможливо, а натурні експерименти потребують значних витрат часу і матеріальних ресурсів. Тоді задачу оптимізації простіше вирішити за допомогою методів математичного планування екстремальних експериментів [1].

Перед проведенням пошуку оптимальних режимів певного процесу, потрібно зібрати найбільш повну інформацію про його характеристики і особливості. Електрофільтри, що застосовуються для очищення газів, відносно прості за конструкцією і надійні в експлуатації. Широке використання фільтрів для уловлювання твердих і рідких частинок зумовлено їх універсальністю і високим ступенем очищення газів при порівняно низьких енерговитратах. Сучасні пристрої цього типу за проектними характеристиками можуть працювати у широких межах концентрацій і дисперсності частинок, при низьких гідравлічних опорах (порядку кількох сотень Па) і невисокій витраті електроенергії (близько 0,5 кВт · год на 1000 м³

© В. П. ЯЦЕНКО, 2012

газів). Разом з тим, незважаючи на відносно просту конструкцію електрофільтра, процеси, які відбуваються в ньому, досить складні і залежні від багатьох факторів.

Аналіз результатів відомих робіт [2, 3] свідчить про те, що ефективність електростатичного очищення значною мірою визначається аеродинамікою пилогазового потоку, фізико-хімічними властивостями газу, концентрацією, дисперсним складом і питомим опором твердих частинок, електричними параметрами апарата, конструкцією електродів, режимами їх живлення і струшування.

З огляду на таку кількість впливаючих факторів оптимізація електрофільтрів одночасно за всіма з них неможлива. У зв'язку з цим на практиці використовується підхід, згідно з яким оптимізацію проводять лише за декількома з перерахованих вище факторів, наприклад, за швидкістю газового потоку і напругою на електродах [4], режимами струшування електродів [5] і т. ін. Використаємо такий підхід.

Пошук оптимального режиму процесу очищення димових газів ТЕС існуючими електрофільтрами. Згідно з [1] для пошуку оптимуму спочатку необхідно вибрати цільову функцію, максимум чи мінімум якої будемо відшукувати. Нехай цільовою функцією буде ефективність осадження частинок золи на осаджувальний електрод, яку будемо визначати за формулою

$$\eta = \sum_{i=1}^n \xi_i \alpha_i, \quad (1)$$

де ξ_i , α_i – ефективність осадження i -ї фракції і її частка у дисперсному складі; n – число фракцій. Величина $\xi_i = \Delta y_i / h$, де h – відстань між площинами коронуючих і осаджувальних електродів; $\Delta y_i = h - y_{i*}$, y_{i*} – найменша ордината точки старту частинки, за якої вона, для даних вихідних умов, досягає осаджувального електрода. Значення y_{i*} відраховується від площини коронуючих електродів.

Зауважимо, що величина η , розрахована з використанням (1), характеризує тільки ймовірність уловлювання частинок, а не ефективність очищення, яка обчислюється за формулою Дейча. Зрозуміло, що чим більша ця ймовірність, тим більшою буде ефективність очищення. Разом з тим використання формули (1) дає можливість точніше визначити вплив різних факторів на рух і осадження частинок.

Після вибору цільової функції потрібно

побудувати найбільш важливі критерії процесу очищення. З наведеного вище аналізу процесу випливає, що його ефективність повністю залежить від тринадцяти розмірних параметрів: швидкості газового потоку U_g в робочому каналі ЕФ; температури газу T_g і його фізичних характеристик – густини ρ_g і в'язкості ν_g ; геометричних характеристик каналу і електродів (довжини каналу L , його ширини $2h$, відстані між коронуючими електродами l і їх діаметра d); напруги на електродах U ; геометричних, фізичних і витратних характеристик частинок – діаметра δ , густини ρ_p , питомого опору ρ_v і концентрації μ .

Зазначимо, що не всі ці параметри є незалежними. Зокрема, властивості газу ρ_g і ν_g залежать від його температури. Оскільки процес очищення димових газів на ТЕС відбувається практично при одних і тих самих температурних режимах, то температуру газів і залежні від неї характеристики для цього процесу можна виключити з наведеного переліку.

Крім того, кожна ТЕС проектується на використання певної марки вугілля. Зрозуміло, що під час його спалювання буде утворюватись зола, частинки якої матимуть практично незмінні густину і питомий опір. Практично незмінною буде також масова концентрація частинок у газовому потоці.

У такому випадку на ефективність процесу будуть впливати сім незалежних розмірних величин. Оскільки кількість базових розмірностей дорівнює трьом (m, s, V), то у відповідності з π -теоремою [1] робочий процес у каналі електрофільтра буде описуватись чотирма числами подібності. Сформуємо такі числа:

$$Re = \frac{2U_g h}{\nu_g}; \quad K = \frac{\delta^2}{dh}; \quad N = h/l; \quad \Xi = \frac{E_0 l}{U}.$$

Тут E_0 – критична напруженість електричного поля, яка визначається за формулою Піка.

Після вибору базових чисел подібності необхідно визначити гранично допустимі межі їх зміни. З цією метою розглянемо результати відомих робіт з електроочищення газів.

При моделюванні процесу очищення вентиляційних викидів горизонтальними електрофільтрами [4] величина швидкості газу варіювалася в межах $U_g = 0,4-2,4$ м/с. Але при заданих витратах димових газів малі значення U_g вимагають великих габаритів ЕФ. Дуже великі швидкості газу ($U_g \approx 3$ м/с) приводять до суттє-

Таблиця 1 – Вихідні дані для пошуку оптимального режиму очищення

Величина	Позначення	Значення	
		Мінімальне	Максимальне
Швидкість газового потоку, м/с	U_g	0,9	2,5
Довжина каналу електрофільтра, м	L	2,56	
Відстань між площинами коронуючих і осаджувальних електродів, м	h	0,15	0,3
Відстань між коронуючими електродами, м	l	0,2	0,3
Діаметр коронуючих електродів, м	d	0,001	0,004
Напруга, В	U	47000	100000
Діаметр частинок, м	δ	$3 \cdot 10^{-6}$	
Густина частинок, кг/м ³	ρ_p	2000	
Діелектрична проникність частинок	ϵ	2	
Електрична стала, с ⁴ А ² /кг·м ³	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$	
Температура газу, К	T_g	393	

вого збільшення вторинного винесення пилу [6]. Але для таких швидкостей течія газу в електрофільтрі буде турбулентною, що сприятиме вирівнюванню профілю потоку в робочому каналі ЕФ.

Важливе значення має також обґрунтований вибір відстані h між площинами коронуючих і осаджувальних електродів. Очевидно, що коефіцієнти осадження золених частинок будуть тим більші, чим менша ця відстань. Цей висновок повністю узгоджується з формулою Дейча, з якої випливає, що величина ефективності η зростає зі зменшенням h . У зв'язку з цим переважна більшість електрофільтрів виготовляється нині з міжелектродним проміжком $2h = 275 - 350$ мм [3, 7]. Разом з тим є дані про розробку і дослідження пілотних і напівпромислових ЕФ з міжелектродною відстанню $2h$ до 1,2 м [8].

З огляду на існуючі дані щодо режимних параметрів роботи електрофільтрів та їх конструктивних характеристик, значення розмірних вихідних величин було вибрано в межах, наведених у табл. 1.

За цими даними обчислено граничні значення чисел подібності, які наведено в табл. 2. Ці значення визначають замкнену область пошуку. Задача полягає у відшуванні певної точки цієї області факторного простору, якій відповідає максимальна величина критерію ефективності.

Пошук цієї точки було здійснено з використанням методів планування багатфакторних експериментів. Оптимізація методом багатфакторного експерименту значною мірою формалізована, і більшість рішень приймається відповідно до вимог стандартної процедури [1].

Таблиця 2 – Границі варіювання чисел подібності

Число подібності	Значення	
	Мінімальне	Максимальне
Re	10493	58297
K	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$
H	0,5	1,5
Ξ	8,2	37,8

Згідно з цією процедурою необхідним етапом пошуку оптимального режиму є вибір початкової (нульової) точки і побудова в кодових змінних x_i плану експерименту. (Тут $i = 1, k$, у нашому випадку $k = 4$).

Нульова точка була вибрана з таких міркувань. Очевидно, що на проведення процесу очищення бажано витратити якомога менше енергії. З огляду на це величина напруги на електродах фільтра повинна бути по можливості меншою. Тоді значення критерію Ξ буде ближчим до максимального з наведених в табл. 2 значень.

Також очевидно, що найбільш важливим і одночасно технічно найбільш складним є видалення з димових газів частинок мікронних розмірів. Якщо такі частинки електрофільтром будуть уловлюватися ефективно, то крупніші за них будуть видалятись з газового потоку ще ефективніше. Таким чином, величина критерію K повинна бути ближчою до мінімальних значень.

Для забезпечення максимальної ефективності електрофільтра потрібно також, щоб час перебування частинок у його робочих каналах був по можливості більшим. Для цього швидкість газового потоку в кожному каналі повинна бути мінімальною. Але з огляду на технологічні умови процесу (ширину каналу, витрати пилогазового потоку, підсмоктування повітря по тракту очищення) вона не може бути меншою певних значень. Аналіз умов очищення димових газів ТЕС відомими електрофільтрами показав, що величина критерію Рейнольдса знаходиться ближче до його середніх значень з діапазону, наведеного в табл. 2.

Оскільки пошук оптимальних режимів проводиться у факторному просторі розмірністю $k = 4$, то план експерименту повинен перед-

бачати проведення не менше ніж $k + 1$ дослідів.

Під час побудови плану експерименту було враховано особливості вибраного методу обчислення коефіцієнта осадження. Згідно з програмою розрахунків величина η визначається за коефіцієнтом осадження ξ_i i -ї фракції та її часткою α_i у дисперсному складі золи. Оскільки, як зазначалося вище, особливо важливим є видалення із золи мікронних частинок, то з метою скорочення тривалості пошуку оптимального режиму в розрахунках доцільно обчислювати коефіцієнти осадження лише одного представницького об'єкта, наприклад, частинки розміром 3 мкм.

Крім того, оскільки півширина каналу h фігурує у виразах для чисел подібності Re , K і H , то практично неможливо побудувати план, згідно з яким кодові змінні x_i , що відповідають цим числам, в конкретному розрахунку будуть знаходитись на різних рівнях. Тому при побудові плану експерименту було прийнято рішення зафіксувати у кожному досліді певне значення h , а інші розмірні величини варіювати з урахуванням цієї фіксації в межах, наведених у табл. 1.

Для початку пошуку було задано мінімальне (з табл.1) значення відстані між площинами коронуючих і осаджувальних електродів. З урахуванням цього для $h = 0,15$ м вибрані такі значення чисел подібності в нульовій точці: $Re = 20000$; $K = 2,4 \cdot 10^{-8}$; $H = 0,6$; $\Xi = 20$ (тут $\eta = 0,413$).

Інтервали варіювання цих чисел відносно нульової точки прийняті такими: $\Delta Re = \pm 2000$;

$$\Delta K = \pm 4 \cdot 10^{-9}; \Delta H = \pm 0,05; \Delta \Xi = \pm 1.$$

Побудований план першого порядку для $k = 4$ (в кодових змінних) і результати розрахунків величини η для $h = 0,15$ м, отримані згідно з цим планом, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення кодових змінних і функції η при $k = 4$

№ дослідів	x_1	x_2	x_3	x_4	η
1	0	0	0	0	0,31
2	1	-1	-1	1	0,15
3	-1	1	-1	1	0,41
4	-1	-1	1	1	0,09
5	1	1	1	-1	0,445

Таблиця 4 – Ефективність уловлювання частинок (круте сходження)

№ дослідю	Значення критерію				η
	Re	$K \cdot 10^8$	H	Ξ	
6	19335	2,8	0,581	19,1	0,580
7	18671	3,2	0,563	18,3	0,760
8	18006	3,6	0,544	17,4	0,960

Після вибору нульової точки і побудови плану експерименту визначається рівняння регресії, що описує цільову функцію процесу. В результаті, для границі варіювання факторів у загальному випадку визначається залежність

$$y = f(a_0, a_1x_1, a_2x_2, \dots, a_ix_i), \quad (2)$$

де a_0, \dots, a_i – коефіцієнти регресії.

Тоді для будь-якої точки області, яка досліджується, може бути визначений напрямок градієнта функції y . Якщо функція представлена рівнянням першого порядку (лінійне наближення), то цей напрямок корелюється з величинами коефіцієнтів регресії a_i при лінійних членах.

У нашому випадку рівняння регресії, за даними табл. 3, має вигляд

$$\eta = 0,413 - 0,0266x_1 + 0,0801x_2 - 0,0299x_3 - 0,0699x_4. \quad (3)$$

Подальші розрахунки оптимального режиму методом крутого сходження проводяться за такою схемою. Спочатку здійснюється перехід від кодівих до натуральних змінних. Для цього обчислюються добутки $a_i\gamma_i$ для всіх значимих факторів. (Тут γ_i – натуральне значення інтервалу варіювання i -го фактора). Далі вибирається фактор, для якого добуток $a_i\gamma_i$ є найменшим за абсолютною величиною, і знаходяться коефіцієнти пропорційності n_i для всіх значимих факторів у вигляді відношення $n_i = |a_i\gamma_i| / (|a_i\gamma_i|_{\min})$.

Коефіцієнтам пропорційності n_i приписують знаки, що відповідають знакам a_i для кожного фактора.

Вибирається який-небудь крок варіювання фактора з найменшим добутком $|a_i\gamma_i|$ для руху по градієнту функції (3). Щодо вибору кроку варіювання слід зазначити, що занадто малий крок потребує значної кількості дослідів при русі до оптимуму, а великий крок створює небезпеку проскакування області оптимуму.

Далі обчислюють кроки для інших факторів, множенням величини вибраного кроку варіювання для фактора з найменшим значенням добутку $|a_i\gamma_i|$ на коефіцієнт n_i .

Будується план наступного етапу пошуку, де рівні факторів змінюються шляхом одночасного додавання чи віднімання до їх значень (залежно від знака коефіцієнта регресії) розрахованих кроків. Така операція повторюється доти, поки буде спостерігатися збільшення вихідної характеристики процесу.

У нашому випадку згідно з рівнянням (3) найменше за абсолютною величиною значення має добуток $x_2\Delta K$. Зважаючи на це, на наступному етапі пошуку оптимуму η було реалізовано круте сходження в напрямку градієнта лінійного наближення функції відклику з кроком $\Delta K = +4 \cdot 10^{-9}$. Кроки зміни інших чисел подібності розраховувались за наведеною вище схемою. Отримано такі значення кроків: $\Delta Re = -665$; $\Delta H = -0,019$; $\Delta \Xi = -0,873$.

З цими кроками при $h = 0,15$ м було виконано досліди 6 – 8, і отримано результати, наведені в табл. 4.

У наступному досліді при кроках $\Delta Re = -80$,

Таблиця 5 – Оптимальні значення чисел подібності

$h, \text{ м}$	Значення критерію				η
	Re	$K \cdot 10^8$	H	Ξ	
0,15	17927	3,6	0,542	17,3	1,0
0,20	24082	3,4	0,722	17,3	1,0
0,25	24718	1,7	0,98	15,2	1,0
0,30	24173	2,2	0,959	18,4	1,0

$$\Delta K = + 4,8 \cdot 10^{-10}, \Delta H = - 0,00228, \Delta \Xi = - 0,105$$

отримано значення $\eta = 1$. Отже, числа подібності, за яких при $h = 0,15$ м буде досягтися оптимум процесу очищення, мають такі значення:

$$Re = 17927; K = 3,65 \cdot 10^{-8}; H = 0,542; \Xi = 17,3.$$

Якщо продовжити рух уздовж градієнта функції (3), то ефективність очищення буде такою самою.

Викладена процедура пошуку оптимальних режимів була застосована і для інших відстаней між коронуючими і осаджувальними електродами. В табл. 5 для прикладу наведено оптимальні числа подібності для чотирьох значень h .

Таким чином, у результаті проведеного пошуку встановлено, що для процесу очищення димових газів вибраним електрофільтром неможливо вказати єдину точку у факторному просторі, де досягається максимальне значення коефіцієнта осадження частинок. Виявилось, що для даного процесу можна вказати лише області значень визначальних критеріїв, в яких забезпечуються оптимальні умови уловлювання частинок золи.

ВИСНОВКИ

Розглянуто вплив конструктивних параметрів електрофільтра і режимів його роботи на ефективність уловлювання частинок із пилогазового потоку. Показано, що оптимізація цих параметрів відкриває можливість підвищення ефективності роботи апарата.

У практиці експлуатації електрофільтрів доцільно мати оптимізаційні залежності, які не потребують великої кількості розрахунків. Для отримання таких залежностей можна використовувати методи теорії планування екстремальних експериментів. Встановлені з використанням цих методів області значень визначальних критеріїв процесу електростатичного очищення димових газів, забезпечують оптимальні значення коефіцієнта осадження частинок на осаджувальний електрод електрофільтра.

Отримані результати можуть бути використані для визначення впливу режимних і конструктивних параметрів електрофільтра на

характеристики руху частинок в його робочих каналах. За цими характеристиками можна спрогнозувати ефективність процесу очищення газів і вибрати оптимальні умови його проведення.

1. *Налимов В.В.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

2. *Очистка промышленных газов от пыли* / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.

3. *Jaworek A.* Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review / A. Jaworek, A. Krupa, T. Czech // Journal of Electrostatics. – 2007. – Vol. 65. – P. 133 – 155.

4. *Акинина А.Г.* Повышение эффективности пылеочистки вентиляционных выбросов котлоагрегатов горизонтальными электрофильтрами: Дис. ... канд. техн. наук, 05.23.03 / А.Г. Акинина. – Макеевка: Донбасская гос. академия строительства и архитектуры, 2003. – 187 с.

5. *Шляхи оптимізації існуючих електрофільтрів на ТЕС України* / І. Вольчин, Л. Руденко, С. Доманський, Т. Пироженко // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 8. – С. 14 – 18.

6. *Бердышев В.Ф.* Системная оценка факторов, влияющих на эффективность работы электрофильтра отходящих газов / В.Ф. Бердышев, К.С. Шатохин, Е.А. Мошкина // Металлург. – 2011. – № 2. – С. 26 – 30.

7. *Чекалов Л.В.* Пути интенсификации работы электрофильтров / Л.В. Чекалов, В.М. Ткаченко // Электрические станции. – 2005. – № 3. – С. 51 – 57.

8. *Chang Ch.L.* Effects of some geometric parameters on the electrostatic precipitator efficiency at different operation indexes / Ch.L. Chang, H. Bai // Aerosol Sci. Technol. – 2000. – Vol. 33, No. 3. – P. 228 – 238.

Надійшла до редколегії 04.12.2012