

О.Л. КОТЛЯРОВ, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.,
 В.Б. РЕДЬКІН, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
 В.П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
 Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича. 172,
 м. Київ, 03680, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИНЧАСТОГО ЕЛЕКТРОФІЛЬТРА

Запропоновано удосконалення відомого аналітичного методу визначення параметрів електричного поля у системі електродів "ряд проводів між заземленими площинами". Для підвищення точності розрахунків параметрів поля праві частини відомих виразів для обчислення поздовжньої і поперечної складових вектора напруженості помножуються на безрозмірний комплекс, який залежить від конструктивних і технологічних характеристик електрофільтра.

Ключові слова: електрофільтр, напруженість електричного поля, складові вектора напруженості, електроди, напруга на електродах.

Електрофільтри (ЕФ) широко застосовуються для очищення димових газів пиловугільних котлів теплових електричних станцій (ТЕС) від легкої золи і належать до найбільш ефективних пиловловлюючих апаратів завдяки низці особливостей. Зокрема:

- З усіх відомих пристроїв для очищення газів електрофільтри мають найменший гідравлічний опір (у деяких апаратах перепад між тиском у вхідному і вихідному газоходах дорівнює 5–15 мм вод. ст.).

- Вони дозволяють уловлювати частинки в широкому діапазоні розмірів (від часток мікрон до декількох міліметрів).

- Концентрація частинок у газах, що очищаються, може коливатися від декількох міліграмів до 200 г/м³ газу, а температура газового середовища може сягати 500°C і вище. Очищення газів може бути як сухим, так і мокрим.

- Електрофільтри можуть працювати як при атмосферному тиску, так і при тисках вище і нижче атмосферного.

- Витрати електроенергії на очищення газів електрофільтрами менші, ніж при застосуванні газоочисних апаратів інших типів.

© О.Л. КОТЛЯРОВ, В.Б. РЕДЬКІН, В.П. ЯЦЕНКО, 2014

- Залежно від конкретних умов і вимог можна сконструювати ЕФ з високим ступенем очищення газів (до 99% і навіть 99,9%) і широким діапазоном продуктивності – від декількох м³/год до мільйонів м³/год.

Разом з тим електрофільтри, встановлені на ТЕС України ще у 60–80-і роки минулого сторіччя, не дозволяють досягти зазначеного ступеня очищення димових газів від золових частинок. У зв'язку з цим вони потребують модернізації, результати якої значною мірою будуть залежати від точності розрахунків впливу режимних і конструктивних параметрів ЕФ на процес електростатичного очищення. Розглянемо можливість підвищення точності розрахунків одного з таких параметрів, а саме величини напруженості електричного поля в каналі пластинчастого електрофільтра.

Прийmemo для визначеності, що канал розташований горизонтально, причому його боковими стінками є осаджувальні електроди (ОЕ), а коронуючими електродами (КЕ) є паралельні між собою циліндричні проводи діаметром D , встановлені вертикально з кроком d вздовж каналу посередині між площинами ОЕ. Відстань від площини з КЕ до осаджувальних електродів позначимо через h . Електричне поле та поля гідродинамічних величин вважаємо

незмінними вздовж коронуючих проводів і симетричними відносно площини, в якій вони розташовані. З огляду на це розглядаємо лише половину каналу по один бік від площини КЕ. Схема розподілу силових ліній електричного поля в міжелектродному проміжку та система координат наведені на рис. 1, вісь x спрямована вздовж потоку димових газів.

Частинки золи заряджаються у полі коронного розряду і рухаються в напрямку осаджувальних електродів під дією аеродинамічної F_a і кулонівської F_C сил. Напрямок вектора F_C збігається з напрямком вектора напруженості електричного поля E . Величина напруженості E

визначається за виразом $E = |\mathbf{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$,

де E_x, E_y – складові вектора у напрямку координатних осей. Аналогічно модуль F_C визначається за

його складовими F_{Cx}, F_{Cy} , як $|\mathbf{F}_C| = \sqrt{F_{Cx}^2 + F_{Cy}^2}$.

Ефект очищення газу від частинок золи в каналі електрофільтра зумовлюється поперечною складовою вектора кулонівської сили F_{Cy} .

Традиційно для розрахунку електрофільтрів використовують методику В.М. Ужова [1]. Згідно із цією методикою вважається, що в міжелектродному просторі каналу електричне поле в усіх точках каналу є однорідним і спрямованим перпендикулярно осаджувальному електроду. Величина електричного поля розраховується за формулою

$$E_n = \sqrt{2Ih / (\pi \epsilon_0 k_i d)}, \quad (1)$$

де I – лінійна густина струму корони,

$$I = \frac{4\pi^2 k_i \gamma U (U - U_0)}{9 \cdot 10^9 d^2 (\pi h / d - \ln(\pi D / d))};$$

k_i – рухомість іонів; d – відстань між сусідніми КЕ; ϵ_0 – електрична стала; γ – коефіцієнт; U, U_0 – напруга на електродах та її критичне значення. Для пластинчатого електрофільтра $U_0 = 0,5 E_0 D (\pi h / d - \ln(\pi D / d))$, де E_0 – критична напруженість електричного поля. Остання розраховується за відомою формулою Піка:

$$E_0 = 30,3 \cdot 10^5 \beta (1 + 0,042 / (\beta D)^{0,5}), \quad (2)$$

де β – відношення густини газу в робочих умовах до густини газу за стандартних умов ($T = 293,15$ К, $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па).

Метод [1] широко застосовується на практиці, проте він не повністю відповідає фізичним уявленням про електричне поле в даній системі і наявним теоретичним і експериментальним даним [2, 3]. Як видно з рис. 1, за такого спрощеного підходу не враховується не лише неоднорідність величини електричного поля в локальних ділянках міжелектродного проміжку поблизу коронуючих електродів, а й наявність у нього в цих ділянках змінної за величиною та напрямком позовжньої складової E_x . По один бік від КЕ ця складова електричного поля діє на частинку вздовж, а по інший – назустріч потоку запиленого газу. Що стосується величини електричного поля в цих ділянках, то тут вона є значно більшою від середньої, оскільки поблизу КЕ силові лінії є густішими, ніж в основній частині каналу.

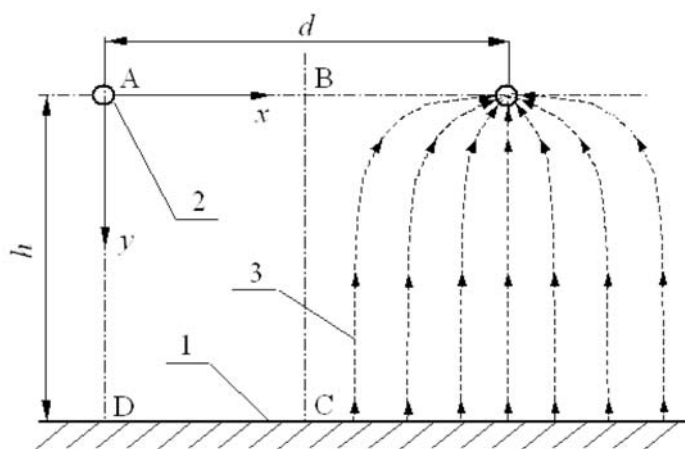


Рис.1. Схема силових ліній електричного поля: 1 – осаджувальний електрод; 2 – коронуючий електрод; 3 – силові лінії

Означені локальні ділянки хоч і займають відносно невелику частину потоку, проте у процесі очищення газу від частинок відіграють значну роль. Це пояснюється тим, що ці ділянки є одночасно зонами коронного розряду, де частинки золи, що там опиняються, отримують від корони від'ємний заряд, завдяки чому під впливом електричного поля вони виштовхуються на периферію потоку до осаджувальних електродів. Величина ж набутого частинками заряду є пропорційною локальній величині електричного поля в зоні корони, через що саме в цій зоні значною мірою формується і визначається очищувальна дія електрофільтра.

Таким чином, проводячи розрахунки очисного ефекту електрофільтра за методом [1], ми не лише нехтуємо відзначеними вище особливостями електричного поля у зоні коронного розряду, а й значно зменшуємо як величину електричного поля, що діє на частинки в цій зоні, так і величину набутого ними електричного заряду. В результаті неадекватного оцінювання кулонівської компоненти сили, що рухає частинки, прогнози ефекту очищення газового потоку можуть виявитись суттєво викривленими.

Для підвищення достовірності розрахунків очищувального ефекту електрофільтра в даній роботі використано теоретичні залежності для компонентів напруженості електричного поля, які відображають відзначені вище особливості локальних зон поблизу КЕ для системи електродів «нескінченний ряд паралельних проводів між паралельними площинами» [2]. Ці залежності мають вигляд

$$E_x = A \sum_{i=-\infty}^{\infty} [(e^n - e^{-n}) \cos \alpha] / B, \quad (3)$$

$$E_y = A \sum_{i=-\infty}^{\infty} [(e^n + e^{-n}) \sin \alpha] / B, \quad (4)$$

де $A = \pi U / (h \ln(\pi D / 8d))$; $B = (e^{2n} + e^{-2n} - 2 \cos 2\alpha)$; $\alpha = 0,5\pi y/h$; $n = 0,5\pi(x + id)/h$; i – індекс підсумовування. Згідно з [2] в формулах (3), (4) із похибкою, що не перевищує 5%, достатньо обмежитись підсумовуванням від $i = -m$ до $i = +m$, де $m = 5 - 7$.

Оскільки значення напруженості електричного поля, розраховані за традиційною методикою В.М. Ужова, задовільно узгоджуються із практикою, то підтвердженням правомірності використання для розрахунків ефективності

роботи електрофільтра теоретичних залежностей (3), (4), в ідеальному випадку, було б отримання рівності $E_* = E_{\Pi}$. Тут E_* – величина електричної напруженості, обчислена осередненням

$$\text{локальних напруженостей } E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$

розрахованих у багатьох точках каналу за виразами (3), (4), по площі його горизонтального перерізу (згідно з вибраним вище його розташуванням); E_{Π} – напруженість, обчислена за формулою (1).

Для перевірки цієї умови було виконано розрахунки величини напруженості E у прямокутній розрахунковій області ABCD каналу електрофільтра, зображеній на рис. 1 (завдяки властивостям періодичності та симетрії електричного поля вздовж каналу для наших цілей достатньо обмежитись цією ділянкою). Вихідні дані для розрахунків варіювалися в широкому, здебільшого характерному для промислових електрофільтрів, діапазоні режимних і конструктивних параметрів. На рис. 2, для прикладу, наведено поперечний розподіл величини E , отриманий при умовах дослідів МЕІ, які розглядаються в [4]. В цих дослідях $D = 0,5$ мм, $d = 60$ мм, $h = 125$ мм, $U = 40$ кВ, $T = 293$ К.

Наведені результати підтверджують тезу про суттєву нерівномірність електричного поля в частині каналу електрофільтра, яка примикає до площини КЕ.

Середнє значення E_* , розраховане за наведеними на рис. 2 даними, дорівнює 5,51 кВ/см, а обчислена традиційним методом за (1) величина E_{Π} становить 9,69 кВ/см, що свідчить про суттєве невиконання умови $E_* = E_{\Pi}$. Необхідно зазначити, що в деяких варіантах розрахунків мало місце ще більше розходження між E_* і E_{Π} .

Для забезпечення виконання зазначеної умови нами запропоновано метод коригування залежностей (3), (4). Обґрунтуванням необхідності такого коригування є також і те, що, на відміну від (1), в цих залежностях не враховуються фізичні властивості газового потоку в каналі електрофільтра та в області коронного розряду.

Крім того, згідно з формулою (1) величина середньої напруженості електричного поля E_{Π} залежить від геометричних характеристик електрофільтра D , d , h . З урахуванням цих характеристик і величин, що входять до формули Піка (2), були побудовані безрозмірні ком-

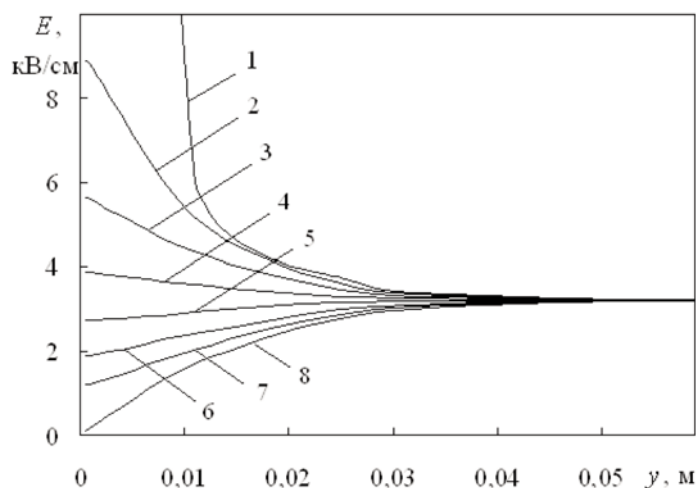


Рис.2. Розподіл E вздовж ліній, що проходять через точки з абсцисами: 1 – $x = 0$ м; 2 – $x = 0,007$ м; 3 – $x = 0,01$ м; 4 – $x = 0,013$ м; 5 – $x = 0,017$ м; 6 – $x = 0,02$ м; 7 – $x = 0,23$ м; 8 – $x = 0,03$ м

плекси $K = E_0 D/U$, $L = h/d$, $M = d/D$ і далі об'єднані у вираз

$$Z = AK^a L^b M^c. \quad (5)$$

Після цього праві частини залежностей (3), (4) були помножені на Z , і ми поставили собі задачу знайти значення коефіцієнта A та показників степеня a , b , c , за яких з максимальною точністю буде виконана умова $E^* \approx E_{\Pi}$.

Для розв'язання цієї задачі використано метод найменших квадратів. В результаті отримано формулу

$$Z = 1,829K^{-0,668}L^{0,297}M^{-0,258}, \quad (6)$$

яка забезпечує виконання умови $E^* \approx E_{\Pi}$.

На рис. 3 наведено зіставлення середніх значень напруженостей електричного поля, розрахованих за традиційною методикою і за методом, запропонованим нами з використанням залежностей (3), (4) і (6).

З наведених даних видно задовільне узгодження величин E^* і E_{Π} . Наприклад, напруженість електричного поля E^* розрахована за методом, що пропонується, для умов дослідів МЕІ становить 9,79 кВ/см, а величина E_{Π} ,

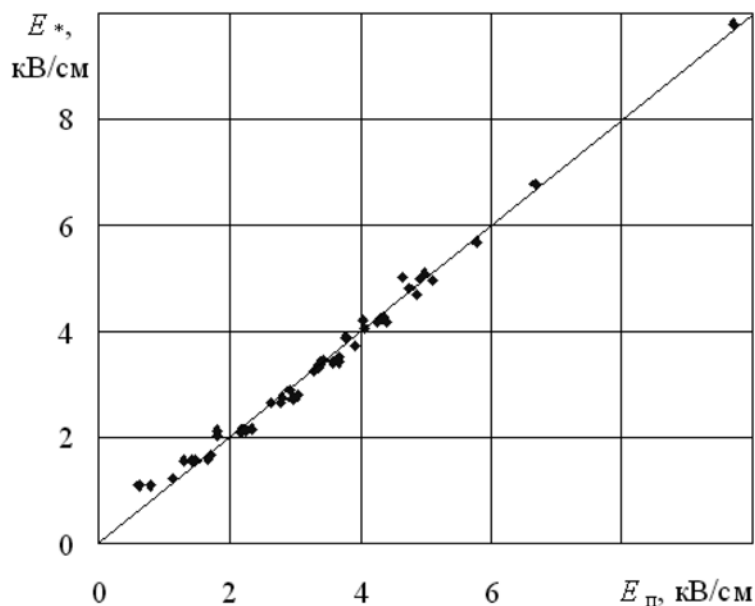


Рис.3. Зіставлення E^* і E_{Π}

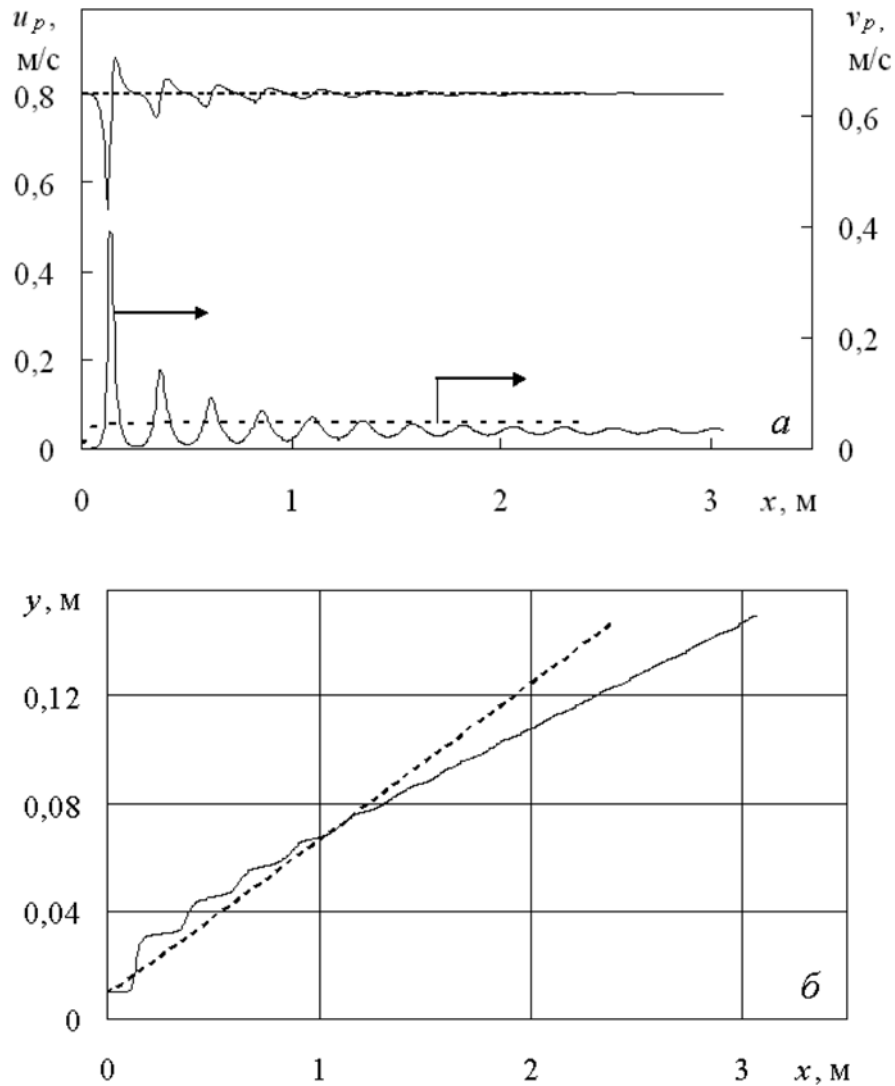


Рис.4. Швидкості частинки (а) і її траєкторії (б) в каналі електрофільтра

обчислена за традиційним методом [1], як зазначалося вище, має значення 9,69 кВ/см.

Наведемо приклад використання запропонованого методу визначення параметрів електричного поля в розрахунках характеристик руху частинок розміром $\delta = 5$ мкм в каналі горизонтального пластинчастого електрофільтра для очищення газів цементного виробництва [1]. Температура газів в процесі очищення становила 423 К. Канал фільтра мав півширину $h = 150$ мм. Коронуєчі електроди діаметром $D = 2,5$ мм розташовані в каналі з кроком $d = 240$ мм. Напруга на електродах становила 46 кВ.

На рис. 4 наведені розподіли поздовжніх u_p і поперечних v_p складових швидкостей частинки

і її траєкторії при розрахунках напруженості електричного поля за розробленим методом (суцільні лінії), і за методикою [1] (штрихові лінії).

Перш за все відзначимо, що при розрахунках складових E_x і E_y за розробленим методом швидкості частинки вздовж каналу (рис. 4, а) мають пульсуючий характер, зумовлений періодичною зміною складових напруженості електричного поля, які не враховуються в методиці [1]. При врахуванні цієї зміни величина v_p поблизу вхідного перерізу каналу перевищує значення поперечної складової швидкості частинки, отримане за методикою [1]. Але середнє значення v_p в каналі фільтра в 1,32 раза менше значення, отриманого за умови

$E_{\pi} = \text{const}$. Ця складова швидкості (швидкість дрейфу) в роботі [1] для узгодження результатів прогнозування ефективності електрофільтра з практикою довільно, без пояснень зменшувалась в 2 рази.

За рахунок того, що величина v_p біля вхідного перерізу каналу при запропонованому методі розрахунків параметрів електричного поля більша, ніж величина цієї швидкості згідно з [1], частинка інтенсивніше рухається у напрямку осаджувального електрода (див. рис. 4, б). Але на ділянках каналу, віддалених від вхідного перерізу, величина поперечної складової швидкості частинки зменшується, і у підсумку вона досягне осаджувального електрода при більших, порівняно з [1], значеннях x . Можливо, що ця виявлена в наших розрахунках особливість руху частинок є однією з причин розбіжності між ефективністю електрофільтра, розрахованою за методикою [1], і практичними значеннями цієї характеристики.

ВИСНОВКИ

Розглянуто два традиційних методи розрахунку параметрів електричного поля в міжелектродному просторі робочого каналу електрофільтра. Показано, що вони не повністю відповідають фізичним уявленням про електричне поле в даній системі і наявним теоретичним та експериментальним даним.

Запропоновано метод визначення параметрів електричного поля в каналі пластинчастого електрофільтра, який виходить із більш реальної, ніж та, що традиційно використовується, картини поля. Отримано уточнені залежності для поздовжньої і поперечної складових вектора напруженості поля. Наведено приклад розрахунку швидкості дрейфу частинок в каналі електрофільтра з використанням цих залежностей. Показано, що отримані результати дозволяють пояснити розбіжності між швидкістю дрейфу, розрахованою за традиційною методикою, і її практичною величиною.

Метод може використовуватись для обчислення характеристик руху і осадження золотих частинок в каналі пластинчастих електрофільтрів та при прогнозуванні їхнього очищувального ефекту.

1. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В.Н. Ужов. – М.: Изд-во «Химия», 1967. – 344 с.
2. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.
3. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий: справочник, Ч. II. – СПб.: Мир и Семья, 2006. – 916 с.
4. Алиев Г. М.-А. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров / Г.М.-А. Алиев, А.Е. Гоник. – М.: Энергия, 1971. – 264 с.

Надійшла до редколегії 12.11.2014