

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРУБЧАСТИХ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАКРУЧУВАННЯ ПОТОКУ ОЧИЩУВАНОВОГО ПОВІТРЯ

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Подільський державний аграрно-технічний університет

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент

І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний аграрно-технічний університет

Р. А. Калініченко, кандидат технічних наук, доцент

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. Нині електрофільтри є ефективними апаратами очищення повітряних потоків різного ступеня забруднення у багатьох галузях промисловості та сільського господарства. Саме вони можуть забезпечити глибоке очищення повітря.

У практиці очищення газів використовують два типи електрофільтрів: пластинчасті та трубчасті. Незважаючи на суттєві переваги, застосування трубчастих фільтрів пов'язано з певними труднощами при очищенні внутрішньої поверхні труб (електродів) від вловленого сухого продукту. Практичний досвід застосування інерційних сил, а саме відцентрових шляхом закручування запиленого потоку в трубі – електроді, свідчить про можливість ефективного очищення осажденного продукту інтенсивним потоком газу.

Мета дослідження – визначення закономірностей процесу видалення частинок (пилу) з повітряного потоку в елементі трубчастого електрофільтру на основі спрощеного траєкторного аналізу руху частинок.

Наведено аналіз руху частинок твердої речовини (пилу виробничих приміщень) в електрофільтрах з пластинчастими і трубчастими електродами. Сформульовані математичні моделі динаміки переміщення частинок під дією електричних, гравітаційних і відцентрових сил. У моделях враховано зміну величини заряду частинки в часі. Аналізом сил діючих на частинку при переміщенні у вихідному плоскопаралельному потоці та низхідному вихровому потоці встановлено значну ефективність використання завихрення пилоповітряного потоку на вході

трубчатих елементів електрофільтру. Подано аналітичні вирази зміни координат рухомої частинки в часі, які дозволяють визначити траєкторії руху частинок в елементах електрофільтрів.

Ключові слова: *частинки пилу, пилоповітряний потік, електричне поле, завихрення потоку, електрофільтр*

Актуальність. При сучасному рівні розвитку технічних засобів пиловловлювання і очищення газових викидів електрофільтри є і залишаються на найближчу перспективу ефективними апаратами очищення повітряних потоків різного ступеня забруднення у багатьох галузях промисловості та сільського господарства. Саме вони можуть забезпечити глибоке очищення (ступінь очищення 99 %), тобто практично повністю видалити із газів тверді та рідкі домішки розміром до 0.01 мкм (при концентрації дисперсної фази до 50 г/м³ і вище).

У практиці очищення газів нині використовують два типи електрофільтрів: пластинчасті та трубчасті (за формою осаджуваних електродів). Трубчасті апарати мають ряд позитивних властивостей: рівномірний розподіл газу (відсутність застійних зон), можливість підтримувати більш високі електричні навантаження (більш висока напруженість електричного поля). У трубчастому електрофільтрі застосовують більші швидкості газу, ніж у пластинчатих апаратах. Однак, незважаючи на суттєві переваги, їх застосування на практиці обмежено вловлюванням в основному рідких компонентів, що зв'язано з певними труднощами при очищенні внутрішньої поверхні труб (електродів) від вловленого сухого продукту (використовується мокрий спосіб – змивання сухого залишку). Вібрації і струшування труб завдяки складності конструктивного рішення практично не застосовуються. Але практичний досвід [1, 3] застосування інерційних сил, а саме відцентрових шляхом закручування запиленого потоку в трубі – електроді, свідчить про можливість ефективного очищення осадженого продукту інтенсивним потоком газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні конструкції; принцип дії і елементи теорії електрофільтрів розглянуто у фундаментальних працях [1-3]; при цьому описані переваги і недоліки існуючих конструкцій електрофільтрів. В

роботах [4-6] розглянуте питання підвищення ефективності пиловловлювання у циклонних апаратах шляхом накладання на пило-повітряний вихровий потік електростатичного поля коронного розряду. У роботі [6] розглянуто на основі експериментальних випробувань електрофільтра з трубчастим електродом при тангенціальній подачі запиленого газу. Лабораторні дослідження визначили підвищення ефективності пилоочищення з 50-60 % для вихрового потоку, до 98-99 % після подачі напруги на електроди. Результати досліджень підтверджують позитивну дію електричного поля на знепилення потоку повітря. Подальші дослідження потребують аналітичних методів визначення ефективних режимних параметрів роботи даного типу апаратів.

Мета дослідження – визначення закономірностей процесу видалення частинок (пилу) з повітряного потоку в елементі трубчастого електрофільтра на основі спрощеного траєкторного аналізу руху частинок.

Матеріали і методи дослідження. Частинка пилу, що знаходиться у відцентровому полі, рухається під дією сил:

$$\overline{F} = \overline{F}_1 + \overline{F}_2 + \overline{F}_3 + \sum \overline{F}_i, \quad (1)$$

де \overline{F} – вектор сили, що приводить частинку до руху; $\overline{F}_1, \overline{F}_2, \overline{F}_3, \sum \overline{F}_i$ – відповідно відцентрова сила, тяжіння, сила опору середовища та сума інших сил (Архімедова, Жуковського, Коріоліса, Магнуса, поперечна, електростатичної взаємодії).

Але, як правило [1, 9] аналітичні методи розрахунку сепарації у циклонних (вихрових) процесах не враховують всього різноманіття факторів, що впливають на видалення частинки з потоку газу. При теоретичному аналізі руху частинки в замкненому потоці вводяться ряд спрощуючих припущень [3, 8]: рух частинки, що приймається за кулю ідеальної форми, розглядається ізольовано від інших частинок; силу інерції вважають рівною відцентровій, спрямованій по радіусу циліндричної оболонки (корпусу циклона, а в нашому випадку трубчастого електрода); тангенціальну швидкість частинки приймають рівною швидкості газу; частинки не обертаються відносно газу, не враховуються Коріолісове прискорення, сили Архімеда, тяжіння, Жуковського-Магнуса, які набагато менші за відцентрову. Сила

електричного поля [10] за величиною порівнянна з відцентровою і силою опору середовища. Частинка, яка досягла стінки корпусу або осаджувального електрода, вважається вловленою.

Результати досліджень та їх обговорення. Розглядається процес відцентрово-електричної сепарації (видалення пилу з повітряного потоку) на прикладі роботи окремого елемента трубчастого електрофільтру. Схема елемента показана на рис. 1. Коронуючий електрод (1) проходить крізь лопатевий завихрювач (2) (зроблений із ізоляційного матеріалу і встановлений на вході металевого циліндра, який є осаджувальним електродом) вздовж вісі циліндра (3). На електрод (1) подається негативний потенціал від джерела високої напруги (4); металевий циліндричний електрод заземлений. Газ, що містить зважені частки пилу, пропускається через лопатевий завихрювач у циліндр. Проходячи через завихрювач, газ набуває обертального руху і по гвинтовій спіралі рухається в основному напрямі. Під дією відцентрових і електричних сил відбувається перерозподіл концентрації пилу по перетину елемента – збільшення у стінок і зменшення в центральній частині. Знепилений потік з центральної частини елемента відводиться через циліндричний канал (5) Периферійний шар пилу в пристінній зоні за інерцією рухається донизу і через торцевий кільцевий зазор видаляється з елемента.

Схема компоновки елементів електрофільтру аналогічна прямоточному батарейному циклону (наприклад конструкції ЦКТІ [1, 3]). На більші крупні частинки більший вплив мають відцентрові сили, на дрібні – електричні.

Основними факторами, що впливають на уловлювання частинок, є їхній розмір, за яким визначається маса частинки і отриманий нею електричний заряд.

Для частинки максимальний електричний заряд який вона отримує в полі коронного розряду, в загальному випадку визначається формулою [7]:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) E d^2, \quad (2)$$

де $\varepsilon_0, \varepsilon$ – діелектрична проникність вакууму і матеріалу частинки; d – діаметр частинки; E – напруженість електричного поля.

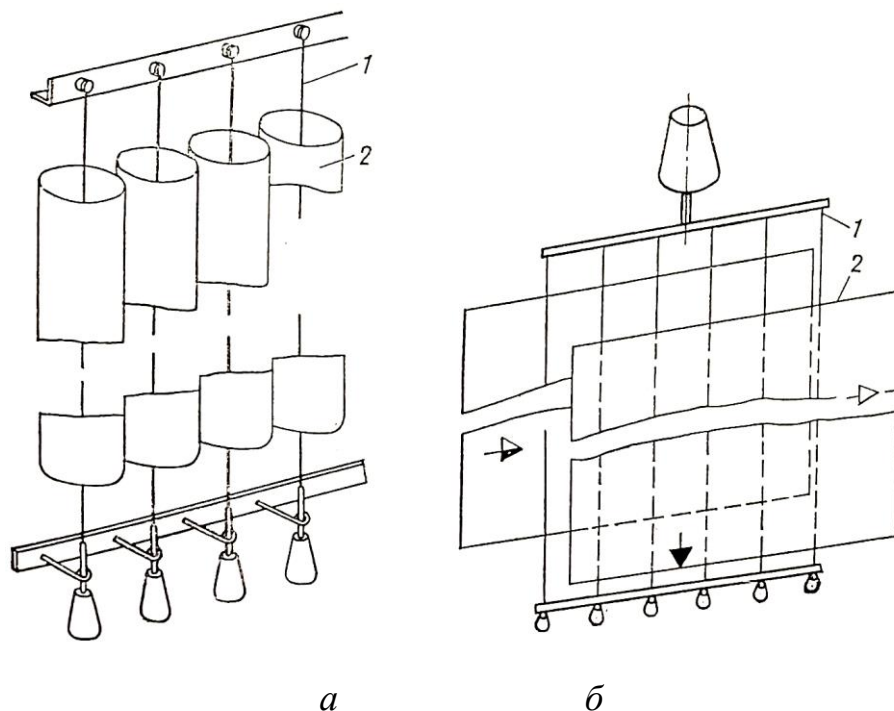


Рис. 1. Конструктивна схема електрофільтру:

a – з трубчастими електродами; *б* – з пластинчастими електродами

Формула (2) визначає максимальний заряд, який набула частинка за проміжок часу t . Для врахування залежності заряду від часу зарядження вираз (2) набуває вигляду:

$$Q(t) = 0.25 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) E \frac{a\tau}{1 + a\tau} d^2, \quad (3)$$

де $a = \pi n e$; n – концентрація іонів і їх заряд (для трубчастого елемента електрофільтру діаметром осаджувального електрода $D = 0.1$ м, а коронуючого $d_k = 5 \cdot 10^{-4}$ м, при напрузі 25 кВ величина $a = 1.57 \cdot 10^2$ [11]).

Сила електричного поля, що діє на частинку залежно від часу зарядження, визначиться відповідно до (3):

$$F_e(t) = Q(\tau)E = AE^2 \frac{a\tau}{1 + a\tau}, \quad (4)$$

$$\text{де } A = \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) 0.25 d^2.$$

Вплив дії сил Архімеда, Жуковського, Коріоліса, Мангуса та електричного вітру не будемо враховувати за малосністю ефекту порівняно з дією сил опору, електричної сили, відцентрової.

Сила опору повітряного середовища визначається відповідно до закону руху за Стоксом [1-3] як функція швидкості руху частинки:

$$F_0 = 3\pi\mu dV \quad (5)$$

де μ – в'язкість запиленого повітря; V – швидкість переміщення частинки.

Відцентрова сила, що діє на частинку:

$$F_v = m \frac{V_\tau^2}{0.5R} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p \frac{V_\tau^2}{0.5R}, \quad (6)$$

де ρ_p, m – густина і маса частинки; V_τ – колова швидкість частинки.

Враховуючи, що колова швидкість V_τ зв'язана з кутовою швидкістю ω залежністю: $V_\tau = R\omega$, відцентрову силу визначимо:

$$F_v = m\omega^2 R = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p \omega^2 R. \quad (7)$$

Рівняння (1) перепишемо у проекції на вісь 0r (рис. 1):

$$m \frac{dV}{dt} = m\omega^2 R - 3\pi\mu dV + A' E^2 d^2 \frac{at}{1+at}, \quad (8)$$

або враховуючи, що $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p$, $V = \frac{dR}{d\tau}$:

$$\frac{dR^2}{dt^2} + B \frac{dR}{d\tau} - \omega^2 R = \frac{at}{1+at} A_1, \quad (9)$$

де $A_1 = \frac{A}{m} = A \frac{6}{\pi d^3 \rho_p}$; $B = \frac{18\mu}{d^2 \rho_p} = \frac{1}{\tau}$, τ – час релаксації.

Для спрощення розв'язку неоднорідного диференціального рівняння (9) апроксимуємо вираз правої частини рівняння експоненціальною залежністю:

$$A_1 \frac{at}{1+at} = D(1 - e^{-kt}). \quad (10)$$

Рівняння (10) з урахуванням (9) набуває вигляду:

$$\frac{dR^2}{dt^2} + B \frac{dR}{d\tau} - \omega^2 R = D - De^{-kt}. \quad (11)$$

Рішення однорідного рівняння :

$$R_0(\tau) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau}, \quad (11a)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4\omega^2}}{2}$ – корені характеристичного рівняння.

Частинне рішення неоднорідного рівняння шукаємо методом невизначених коефіцієнтів у вигляді:

$$R_n(\tau) = R_1 + R_2 e^{-kt}, \quad (11b)$$

де R_1, R_2 – невідомі сталі.

Підставляємо значення $R_n(\tau)$ в рівняння (11)

$$k^2 R_2 e^{-kt} - kBR_2 e^{-kt} - \omega^2 (R_1 + R_2 e^{-kt}) = D - De^{-kt},$$

прирівнюємо коефіцієнти

$$\begin{cases} k^2 R_2 - kBR_2 - \omega^2 R_2 = -D \\ -\omega^2 R_1 = D \end{cases}, \text{ звідки } R_1 = -\frac{D}{\omega^2}; R_2 = \frac{D}{k^2 - kB - \omega^2}.$$

Загальний розв'язок рівняння (11) має вигляд:

$$R(\tau) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} - \frac{D}{\omega^2} + \frac{D}{k^2 - kB - \omega^2} e^{-kt}. \quad (12)$$

Сталі інтегрування визначимо за початкових умов: $\tau = 0$; $R = R_0$; $\frac{dR}{dt} = 0$, r_1 – початкова координата місця вводу частинки в трубчастий елемент, вони будуть

дорівнювати: $C_1 = R_0 - \frac{D}{r_1 - r_2} \left(\frac{r_2}{\omega^2} - \frac{k + r_2}{k(k - B) - \omega^2} \right); C_2 = \frac{D}{r_1 - r_2} \left(\frac{r_2}{\omega^2} + \frac{k + r_1}{k(k - B) - \omega^2} \right).$

Рівняння (12) дозволяє визначити час перебування частинки в елементі трубчастого електрофільтра при переміщенні від місця вводу (R_0) до стінки осаджувального електрода $R = R_s$ (частинка вважається вловленою при досягненні стінки осаджувального електрода).

Для визначення відстані, на яку переміщується частинка пилу (від місця вводу в трубчастий електрод до його стінки) у вертикальному напрямку запишемо рівняння для руху частинки у вертикальному напрямку:

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{1}{\tau} \left(V_z - \frac{dZ}{dt} \right) - g, \quad (13)$$

де V_z – складова осьової швидкості повітря.

Для гвинтового завихрювача справедливе співвідношення [8,12]:

$$V_z = \frac{S}{\pi R} V_\varepsilon = \frac{S}{\pi} \omega. \quad (14)$$

Перепишемо рівняння (13) з врахуванням (14):

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} + B \frac{dZ}{dt} = \frac{S\omega}{\pi\tau} - g = C. \quad (15)$$

Розв'язок рівняння (15) за початкових умов: $t = 0$; $R = R_0$; $\frac{dZ}{dt} = V_{z0}$, $Z = 0$ має вигляд:

$$Z(t) = \frac{C}{B} - \frac{1}{B} \left(\frac{C}{B} - V_{z0} \right) e^{-Bt}. \quad (16)$$

З рівняння (12) і (16) визначаємо траєкторію руху частинки $Z(R)$, відповідно довжину електрода, достатньою для вловлювання частинки.

Оскільки час перебування частинки в трубці фільтру пропорційний куту обертання, тобто $d\varphi/dt = \omega$, то замінюючи в рівнянні (11) $\frac{1}{dt} = \omega \frac{1}{d\varphi}$, отримаємо

рівняння траєкторії обертального руху частинки:

$$R(\varphi) = C_1 e^{\frac{r_1}{\omega}\varphi} + C_2 e^{\frac{r_2}{\omega}\varphi} + \frac{D}{\omega^2} + \frac{D}{k^2 - kB - \omega^2} e^{-\frac{k}{\omega}\varphi}.$$

Розглянемо рух частинки в електрофільтрі з плоскими електродами [2]. У загальному випадку на частинку діють сили тяжіння $G = mg$, опору $F_c = 6\mu r_0(V_n - V_z)$ і електрична сила $F_e(t)$ (рівняння (4)). Рівняння (векторна форма) динаміки руху частинки має вигляд:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = 6\pi\mu r_0 (\bar{V}_n - \bar{V}) + m\bar{g} + \bar{F}_e(t). \quad (18)$$

Проектуючи рівняння на осі прямокутних координат $0xz$ (рис. 2) матимемо:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \frac{1}{\tau} V_x + \frac{1}{m} F_e(t); \\ \frac{dV_z}{dt} = \frac{1}{\tau} (V_n - V_z) - g; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{dV_z}{dt} = \frac{1}{\tau} (V_n - V_z) - g; \end{cases} \quad (20)$$

де $V_x = \frac{dx}{dt}$; $V_z = \frac{dz}{dt}$.

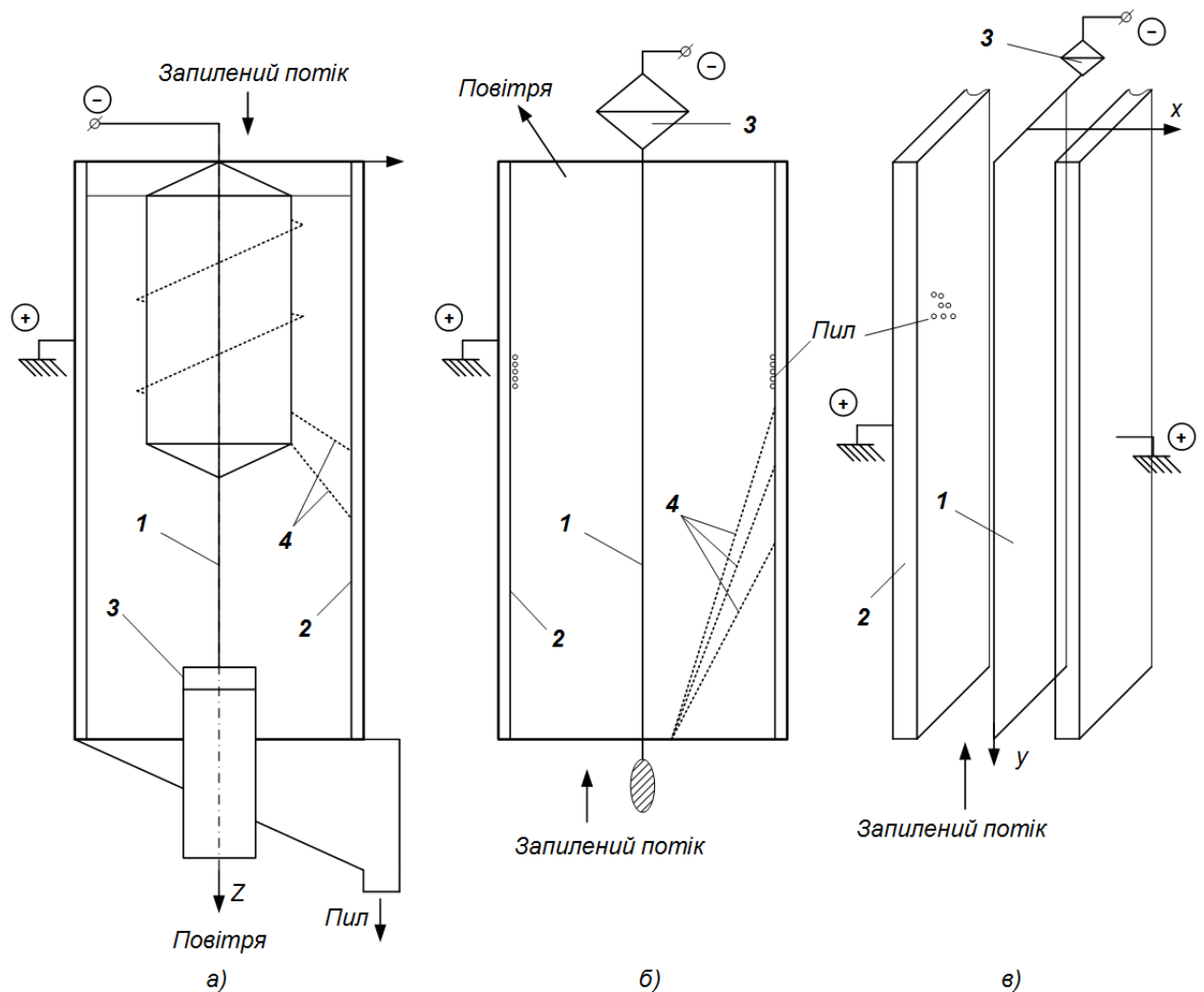


Рис. 2. Розрахункові схеми електрофільтрів:

а – трубчастий-вихровий; *б* – трубчастий; *в* – плоский; 1 – коронуючий електрод; 2 – осаджувальний електрод; 3 – ізолятор; 4 траєкторії руху

Розв'язки рівняння (19-20) ідентичні розв'язку рівняння (13). Рівняння (19) перепишемо з урахуванням $F_e(t)$ виразу (10):

$$\frac{dV_x}{dt} + BV_x = D(1 - e^{-kt}). \quad (21)$$

Розв'язок рівняння за початкових умов: $t = 0$; $V_x = V_{x0}$ матиме вигляд:

$$V_x(t) = V_{x0}e^{-Bt} + \frac{D}{B}(1 - e^{-Bt}) + \frac{D}{B-k}(e^{-Bt} - e^{-kt}). \quad (22)$$

Оскільки $V_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$, то розв'язок (22) матиме вигляд:

$$x(t) = -\frac{V_{x0}}{B}e^{-Bt} + \frac{D}{B}t + \frac{D}{B}e^{-Bt} - \frac{D}{(D-k)B}e^{-Bt} + \frac{D}{(B-k)k}e^{-kt} + C, \quad (23)$$

При $t = 0$; $x = 0$: $C = \frac{V_{x0}}{B} - \frac{D}{B} + \frac{D}{D-k} \left(\frac{e^{-bt}}{B} - \frac{e^{-kt}}{k} \right)$, тоді запишемо рівняння (23)

у вигляді:

$$x(t) = -\frac{V_{x0}}{B}e^{-Bt} + \frac{D}{B}t + \frac{D}{B}e^{-Bt} - \frac{D}{(D-k)B}e^{-Bt} + \frac{D}{(B-k)k}e^{-kt} + \frac{V_{x0}}{B} - \frac{D}{B} + \frac{D}{D-k} \left(\frac{e^{-bt}}{B} - \frac{e^{-kt}}{k} \right). \quad (24)$$

Аналогічно розв'яжемо рівняння (20):

$$Z(t) = \frac{C}{B} - \frac{1}{B} \left(\frac{C}{B} - V_{z0} \right) e^{-Bt}, \quad (25)$$

де $C = \frac{S\omega}{\pi\tau} - g$.

Отримані рівняння (24) і (25) дозволяють визначити траєкторію руху частинки в між електродному просторі $x(z)$ (рис. 3).

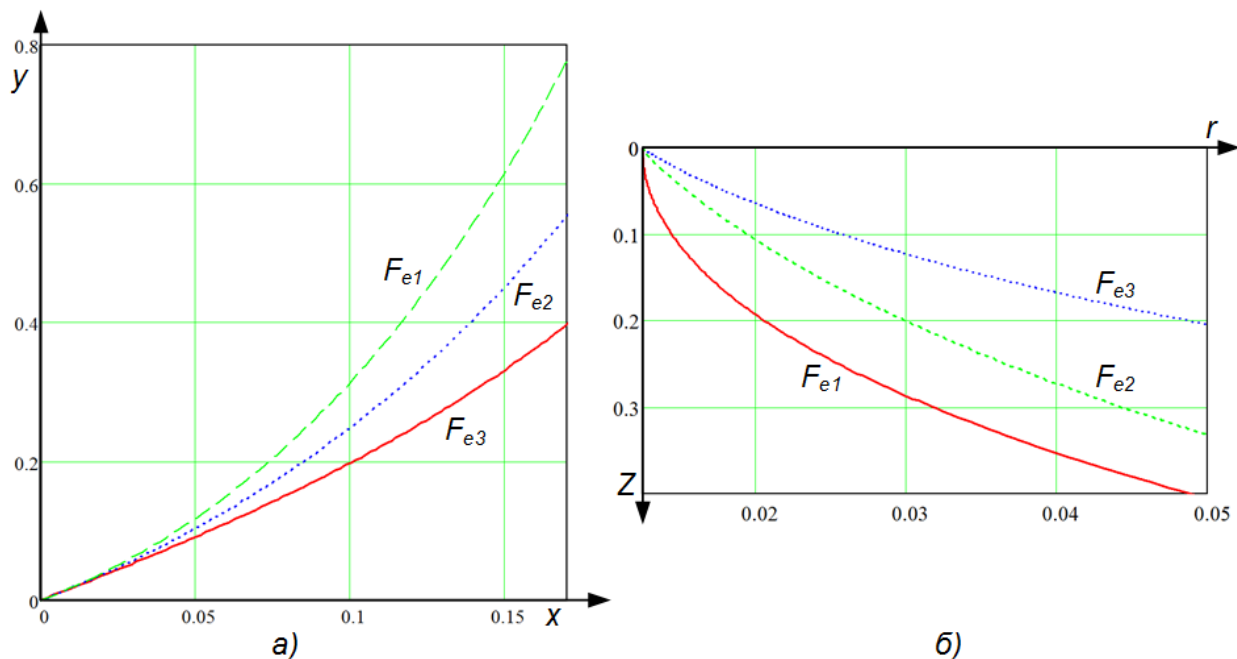


Рис. 3. Розрахунок траєкторій руху частинок в електрофільтрі: пластинчастому (а) та трубчастому із завихренням (б) ($F_{e1} = 0.07$; $F_{e2} = 0.1$; $F_{e3} = 0.4$)

Порівнюючи траєкторії частинки в трубчастому електрофільтрі (рис. 1) і пластинчастому (рис. 2), можна відмітити значне скорочення шляху переміщення при завихрюванні запиленого потоку в трубчастому електрофільтрі.

Висновки

1. На основі аналізу силової взаємодії частинки пилу з повітряними потоками в накладеному полі коронного розряду сформульовані математичні моделі руху частинки в елементах електрофільтрів з плоскими і трубчастими елементами з урахуванням кінетики заряджання частинок.

2. За результатами аналізу отриманих моделей визначено суттєве підвищення ефективності знепилювання повітряних потоків у виробничих сільськогосподарських приміщень.

Список використаних джерел

1. Алиев Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

2. Алиев Г. М. А, Гоник А. Е. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров. М.: Энергия, 1971. 264 с.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. М., Химия, 1981. 616 с.
4. Пеньков Н. В., Ведерников В. Б. Расчет эффективности процесса пылеулавливания в циклонах. Журн. прикл. химии. 1984. 57(5). 1057–1061.
5. Новиков Л. М., Быков В. А., Илюшкин Н. В., Заостровский Ф. П., Воронова Т. И., Лысенко Т. В. Исследование основных закономерностей процесса пылеулавливания в электроциклонах. УНИХИМ, Вып. 54. 1982. 20–24.
6. Костенюк А. М. Интенсификация процессов электростатического осаждения в пищевой промышленности: дис. ...канд. техн. наук, КТИПП. К., 1963. 198 с.
7. Карасенко В. А., Заяц Е. М., Баран А. Н. Электротехнология : учеб. пособие. М.: Колос, 1992. 304 с.
8. Шиляев М. И., Дорохов А. Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования : учеб. пособие. Томск, 1999. 209 с.
9. Степанов Г. Ю., Зицер И. М. Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
10. Белоусов, В. В. Теоретические основы процессов газоочистки. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
11. Балабанов Е. В., Боровик М. Г., Соломон Л. С. Электрическая сепарация формовочных песков. Москва : Машгиз, 1951. 186 с.
12. Котов Б. І., Степаненко С. П., Грищенко В. О. Аналіз процесу знепилювання повітряних потоків в прямоточному циклоні з поперечно-поточною зоною сепарації. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 205 «Проблеми надійності машин». 2019. С. 275-279.

References

1. Aliyev, G. M. (1986). Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov [Technique of dust removal and purification of industrial gases]. Metallurgiya, 544.
2. Aliev G. M. A, Gonik A .E. (1971). Elektrooborudovanie i rezhimy pitaniya elektrofil'trov [Electrical equipment and power modes of electrostatic precipitators]. Moscow: Energiya, 264.
3. Straus V. (1981). Promyshlennaya ochistka gazov [Industrial gas cleaning]. Moscow, Khimiya, 616.
4. Pen'kov, N.V., Vedernikov, V.B. (1984). Raschet effektivnosti protsessa pyleulavlivaniya v tsiklonakh [Calculation of the efficiency of the dust collection process in cyclones]. Zh. adj. Chemistry. 57(5). 1057–1061.
5. Novikov, L.M., Bykov, V.A., Ilyushkin, N.V., Zaostrovsky, F.P., Voronova, T.I., Lysenko, T.V. (1982). Issledovaniye osnovnykh zakonomernostey protsessa pyleulavlivaniya v elektrotsiklonakh [Investigation of the main laws of the process of dust collection in electric cyclones]. UNIKHIM. 54. 1982. 20–24.
6. Kostenyuk, A.M. (1963). Intensifikatsiya protsessov elektrostatischeosazhdeniya v pishchevoy promyshlennosti: dis. ...kand. tekhn. nauk [Intensification of electrostatic deposition processes in the food industry: dis cand. tech. of sciences], KTIPP. Kyiv, 198.

7. Karasenko, V. A., Zayats, E. M., Baran, A. N. (1992) Elektrotekhnologiya : ucheb. posobie [Electrotechnology: textbook. allowance]. Moskow: Kolos, 304.
8. Shilyayev, M. I., Dorokhov, A. R. (1999). Metody rascheta i printsipy komponovki pylulavlivayushchego oborudovaniya: ucheb.posobiye [Calculation methods and principles of the arrangement of dust-collecting equipment: textbook]. Tomsk. 209.
9. Stepanov, G.YU., Zitser, I. M. (1986). Inertsionnyye vozdukhochistiteli [Inertial air purifiers]. Moskow: Mashinostroyeniye, 184.
10. Belousov, V. V. (1988). Teoreticheskiye osnovy protsessov gazoochistki [Theoretical foundations of gas cleaning processes]. Moscow: Metallurgy. 256.
11. Balabanov, E. V., Borovik, M. G., Solomon, L. S. (1951). Elektricheskaya separatsiya formovochnykh peskov [Electrical separation of molding sand]. Moscow: Mashgiz, 186.
12. Kotov B. I., Stepanenko S. P., Hryshchenko V. O. (2019). Analiz protsesu znepyliuvannia povitrianykh potokiv v priamotochnomu tsykloni z poperechno-potochnoiu zonoiu separatsii [Analysis of the process of dedusting air streams in a direct-flow cyclone with a transverse flow separation zone]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva, 205 «Problemy nadiinosti mashyn». 275–279.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАКРУТКИ ПОТОКА ОЧИЩАЕМОГО ВОЗДУХА

***Б. И. Котов, В. А. Грищенко, Ю. И. Панцирь, И. Д. Герасимчук,
Р. А. Калиниченко***

Аннотация. *В настоящее время электрофильтры являются эффективными аппаратами очистки воздушных потоков разной степени загрязнения во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Именно они могут обеспечить глубокую очистку воздуха.*

В практике очистки газов используют два типа электрофильтров: пластинчатые и трубчатые. Несмотря на существенные преимущества, применение трубчатых фильтров связано с определенными трудностями при очистке внутренней поверхности труб (электродов) от уловленного сухого продукта. Практический опыт применения инерционных сил, а именно центробежных путем закручивания запыленного потока в трубе - электроде, свидетельствует о возможности эффективной очистки осажденного продукта интенсивным потоком газа.

Цель исследования - определение закономерностей процесса удаления частиц (пыли) с воздушного потока в элементе трубчатого электрофильтра на основе упрощенного траекторного анализа движения частиц.

Приведен анализ движения частиц твердого вещества (пыли производственных помещений) в электрофильтрах с пластинчатыми и трубчатыми электродами. Сформулированы математические модели динамики перемещения частиц под действием электрических, гравитационных и

центробежных сил. В моделях учтены изменение величины заряда частицы во времени. Анализом сил, действующих на частицу при перемещении в исходном плоскопараллельном потоке и нисходящем вихревом потоке, установлено значительную эффективность использования завихрения пылевоздушного потока на входе трубчатых элементов электрофильтра. Приведены аналитические выражения изменения координат подвижной частицы во времени, которые позволяют определить траектории движения частиц в элементах электрофильтров.

Ключевые слова: *частицы пыли, пылевоздушный поток, электрическое поле, завихрения потока, электрофильтр*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF TUBULAR ELECTROFILTERS BY APPLYING TWISTED FLOW OF CLEANED AIR

**B. Kotov, V. Hryshchenko, Yu. Pantsyr., I. Herasymchuk.,
R. Kalinichenko.**

Abstract. *Today, electrostatic precipitators are effective devices for cleaning air streams of varying degrees of pollution in many industries and agriculture. They can provide deep purification of air.*

In the practice of gas purification, two types of electrostatic precipitators are used: plate and tubular. Despite the significant advantages, the use of tubular filters is associated with certain difficulties in cleaning the inner surface of the pipes (electrodes) from the trapped dry product. Practical experience in the application of inertial forces, namely centrifugal by twisting the dust flow in the tube - the electrode, indicates the possibility of effective purification of the precipitated product by an intensive gas flow.

The purpose of the study is to determine the patterns of the process of removing particles (dust) from the air flow in the element of the tubular electrostatic precipitator on the basis of a simplified trajectory analysis of particle motion.

The analysis of the motion of solid particles (dust of industrial premises) in electrostatic precipitators with plate and tubular electrodes is given. Mathematical models of the dynamics of particle motion under the action of electric, gravitational and centrifugal forces are formulated. The models take into account the change in the magnitude of the particle charge over time. The analysis of the forces acting on the particle during the movement in the initial plane-parallel flow and the descending vortex flow revealed a significant efficiency of using the vortex of the dust-air flow at the inlet of the tubular elements of the electrostatic precipitator. Analytical expressions of change of coordinates of a moving particle in time which allow to define trajectories of movement of particles in elements of electrostatic precipitators are given.

Key words: *dust particles, dust air flow, electric field, flow vortex, electrostatic precipitator*