

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗНЕПИЛЮВАННЯ
ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ВИКИДІВ В ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАХ ВИРОБНИЧИХ
ПРИМІЩЕНЬ І АГРЕГАТИВ**

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

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. Нині для створення мікроклімату у виробничих спорудах агропромислового виробництва широке застосування отримали утилізатори відпрацьованої теплоти вентиляційних викидів. Але повітря таких приміщень засмічене пиловими домішками і має підвищений вологовміст, внаслідок чого, на теплопередаючі поверхні випадає конденсат, а на зволожену поверхню налипає пил.

Як наслідок ефективність теплоутилізаторів суттєво знижується, а гідравлічний опір збільшується, що може викликати зменшення подачі повітря. Тому виникає потреба боротьби із запиленістю повітря, яке подається в теплоутилізатори.

Найбільш розповсюдженим методом очищення газових потоків від твердих пилових домішок є осадження останніх в електрофільтрах, для підвищення ефективності яких застосовують гравітаційну рухому водяну плівку.

Нині відсутні математичні описи і розрахункові залежності для горизонтальних електрофільтрів та електрогідроциклонів.

Метою дослідження є формулювання математичного опису процесів переміщення твердих частинок у камерах горизонтального електрофільтру і електрогідроциклона.

Наведено аналіз існуючих систем теплоутилізації викидного повітря та вплив запиленості на ефективність їх використання. Розглянуто можливість застосування різноманітних систем для очищення від пилу викидного повітря в спорудах агропромислового виробництва. Запропонована технологічно-конструктивна схема електротехнологічного комплексу утилізації теплоти вентиляційних викидів, яка включає електрогідроциклон для очищення від пилу викидного повітря. Проаналізовано дію визначаючих сил, у тому числі і електричної, на рух частинки пилу в обертovому потоці електрогідроциклона.

Визначені рівняння, які описують рух частинки в повітряному обертovому потоці при дії електричного поля, і складені математичні моделі для розрахунку траєкторії руху частинки пилу. Подано спрощені аналітичні вирази для траєкторій руху частинки.

Ключові слова: *пил, сепарація, електричне поле, циклон, повітряний потік*

Актуальність. У сучасних системах створення технологічного мікроклімату у виробничих спорудах агропромислового виробництва широке застосування отримали утилізатори відпрацьованої теплоти вентиляційних викидів. Але повітря виробничих (наприклад, птахівничих) приміщень засмічене пиловими домішками і має підвищений вологовміст. При проходженні такого повітрянодисперсного потоку крізь оребрені труби теплоутилізатора, охолоджуючого припливним повітрям, на теплопередаючі поверхні випадає конденсат, а на зволожену поверхню налипає пил.

Ефективність теплоутилізаторів суттєво знижується, гідравлічний опір збільшується, що може викликати зменшення подачі повітря. Тому виникає потреба боротьби із запиленістю повітря, яке подається в теплоутилізатори.

Найбільш розповсюдженим методом очищення газових потоків від твердих пилових домішок є осадження останніх в електрофільтрах. Ефективність електрофільтра можна значно підвищити, використовуючи для очищення осаджувальних електродів гравітаційну рухому водяну плівку. Але дефіцит водних ресурсів зумовлює включення в технологічну схему рециркуляцію води та її проміжне очищення від твердих включень (частинок). Остання операція найбільш ефективно реалізується в гідроциклонах під дією відцентрових сил. Для визначення ефективності роботи циклонного водоочищувача необхідно мати математичний опис процесу переміщення частинки в гідроциклонному елементі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізом існуючих способів і технічних засобів, наведених в узагальнюючих роботах [1, 2], встановлено високу ефективність використання електричних фільтрів для знепилювання вентиляційних викидів. У роботах [3, 4] проаналізовано роботу електроциклона [3] та трубчастих і плоских електрофільтрів [4]; отримано розрахункові залежності для визначення траєкторій руху частинок в закрученому повітряному потоці. У роботі [5] визначено

ефективність використання змоченої поверхні корпусу прямого циклона. У роботі [6] запропоновано очищення забрудненої води електрогідроциклоном, але відсутні характеристики електрогідроциклона. У літературних джерелах відсутні математичні описи і розрахункові залежності для горизонтальних електрофільтрів та електрогідроциклонів.

Мета дослідження – формулювання математичного опису процесів переміщення твердих частинок у камерах горизонтального електрофільтру і електрогідроциклона.

Матеріали і методи дослідження. Надійним методом визначення ефективності функціонування устаткування для сепарації (видалення) твердих включень з повітряних і рідинних потоків є траєкторний аналіз руху твердого компонента. Знаходження траєкторій частинок зводиться до складання і розв'язку диференціальних рівнянь переміщення однієї частинки при сумісній дії сил інерції і електричних сил.

Результати досліджень та їх обговорення. Запропоновано для знепилювання відпрацьованого вентиляційного повітря приміщень з утримання молодняка тварин і птиці використовувати електротехнологічний комплекс, який складається з горизонтального електрофільтра із зрошувальними осаджувальними електродами та електрогідроциклона для очищення рециркулюючої рідини після змиву електродів. Схема комплексу показана на рис. 1.

Для обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів електрофільтра та гідроциклона сформульовано математичні моделі руху твердих частинок у камерах горизонтального електрофільтра і вертикального електрогідроциклона. При ідеалізації реального процесу прийняті такі припущення: рух частинки, форма якої приймається за кулю, розглядається ізольовано від інших частинок; рух повітряного потоку рівномірний, стаціонарний; силу опору повітряного потоку приймаємо за законом Стокса (сила опору пропорційна швидкості обтікання частинки); силами Архімеда, поперечними силами (підйомною і Магнуса) нехтуємо; частинка, яка досягла осаджувального електрода вважається

влівленою; повітряний потік горизонтальний, електрична сила спрямована нормально до площин електродів – поперек потоку.

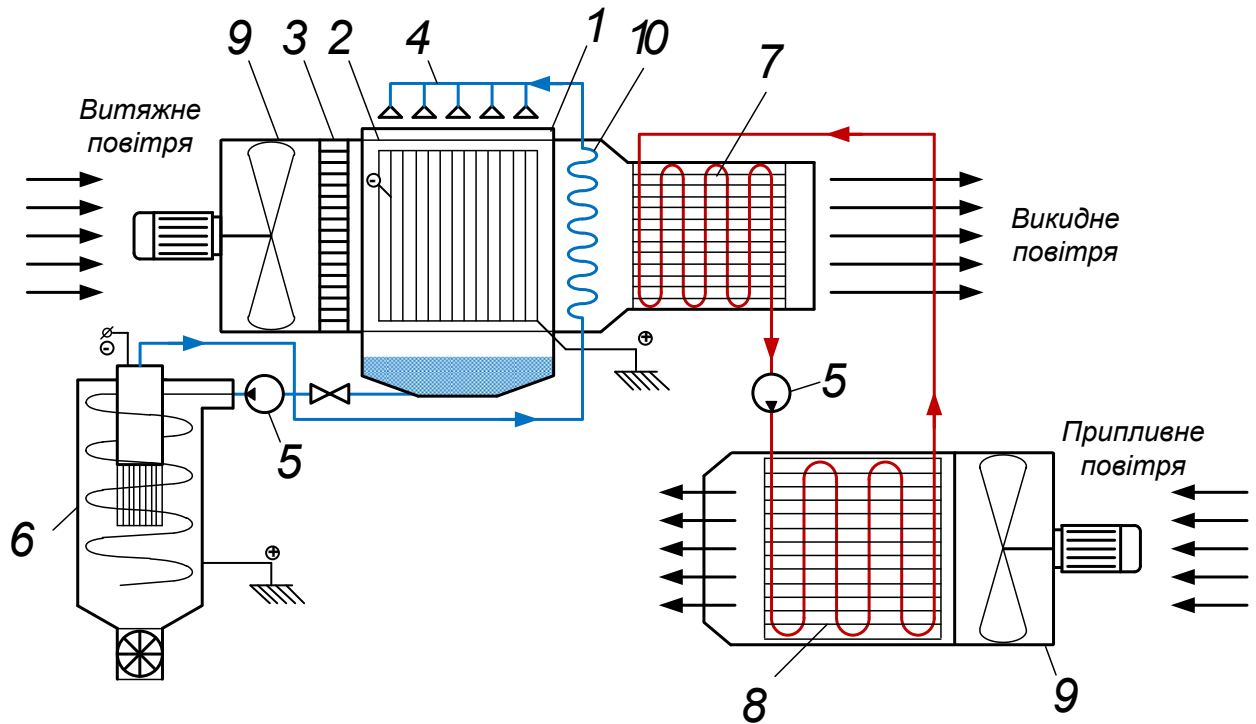


Рис. 1. Технологічно-конструктивна схема електротехнологічного комплексу утилізації теплоти вентиляційних викидів:

1 – корпус електрофільтра; 2 – електроди; 3 – повітророзподільна решітка; 4 – розпилювачі рідини; 5 – насоси; 6 – гідроциклон; 7, 8 – теплообмінники; 9 – вентилятори; 10 – теплообмінник контуру циркуляції рідини

Рівняння поступального руху частинки запишеться у вигляді:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = R + G + F_{el}, \quad (1)$$

де $m = \rho_r V_r = \rho_r \frac{\pi d^3}{6}$ – маса частинки; d_r – діаметр частинки; V_r – об'єм частинки;

$\bar{R} = 3\pi\mu d U$ – сила опору повітряного середовища; V – швидкість частинки;

$U = V_n - V_r$ – відносна швидкість; V_n – швидкість потоку повітря; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості несучого середовища; $G = mg$ – сила тяжіння; g –

прискорення вільного падіння; $F_{el} = 0.25 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) E^2 d^2 \varepsilon_0$ – сила електричного

поля [1, 2]; $\varepsilon_0, \varepsilon$ – діелектрична проникність вакууму і матеріалу частинки; E – напруженість електричного поля.

Проектуючи рівняння (1) на осі прямокутних координат $OXYZ$ відповідно до [8] отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$m \frac{dV_x}{dt} = -k_0 (V_n - V_x) \sqrt{(V_n - V_x)^2 + V_y^2 + V_z^2}, \quad (2)$$

$$m \frac{dV_y}{dt} = -k_c V_y \sqrt{(V_n - V_x)^2 + V_y^2 + V_z^2} + 0.25 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right) E^2 d_r^2, \quad (3)$$

$$m \frac{dV_z}{dt} = -k_c V_z \sqrt{(V_n - V_x)^2 + V_y^2 + V_z^2} + mg, \quad (4)$$

де $V_x = \frac{dx}{dt}$; $V_y = \frac{dy}{dt}$; $V_z = \frac{dz}{dt}$; $k_z = 3\pi\mu d_r$.

Інтегруючи рівняння (2) – (4) в комп'ютерному середовищі MathCAD або MATLAB при початкових умовах: $x=0$; $y=0$; $z=0$; $V_x=V_{x0}$; $V_y=0$; $V_z=0$, отримуємо складові швидкості і переміщення частинки від часу перебування в міжелектродному просторі та траєкторії переміщення частинок різного розміру (d_1, d_2, \dots, d_i), й визначаємо розмір частинок, які не осаджуються на електродах.

Для розрахунку траєкторій руху твердих частинок в гідроциклоні (для видалення твердої фракції з рідкого змиву електродів фільтра) використано вихрову теорію [2] руху твердої частинки у відцентровому полі, яка припускає, що обертання рідинного потоку уніформно за тангенціальною швидкістю і характеризується радіальною, азимутальною та осьовою компонентами U_τ , ω , U_z а кутова швидкість потоку $\omega = \frac{U_\tau}{R} = const$ є сталою величиною.

При цьому до відцентрової сили, сили опору і коріолісового прискорення додається електрична сила, яка діє в радіальному напрямку та складова, що враховує центральний сток.

Систему диференціальних рівнянь руху частинки в полярних координатах (r, φ) можна записати у такому вигляді:

$$\frac{dV_r}{dt} = \frac{V_\varphi^2}{r} + k'_c (V_r - \omega), \quad (5)$$

$$\frac{dV_\varphi}{dt} = -\frac{V_r V_\varphi}{r} + k'_c (V_\varphi - \omega), \quad (6)$$

$$\frac{dV_z}{dt} = k'_c (V_z - \omega_z) - g, \quad (7)$$

де $V_r = \frac{dr}{dt}$; $V_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$; $k'_c = 18\mu(\rho_r - \rho_p)d_r^2$; ω_z – осьова швидкість рідини.

Початкові умови: $t = 0$; $r = R$; $\frac{dr}{dt} = 0$; $\frac{d\varphi}{dt} = \omega$; $z = 0$; $V_z = \omega_{z0}$.

Параметри руху частинки визначається інтегруванням рівнянь (5) – (7) при зазначених початкових умовах. Першорядним завданням є визначення часу t , протягом якого частинка пройде шлях від R_0 до стінки циклона, щоб визначити час перебування частинки і об'єм циклона. У подальшому визначаються траєкторії руху частинок у корпусі циклона.

Висновки і перспективи.

1. Для забезпечення ефективної роботи теплоутилізаторів з трубноорєбренними теплообмінниками необхідно попереднє знепилювання вентиляційних викидів.
2. Запропоновано використання електрофільтра з мокрим очищенням електродів і гідроциклона для очищення змитої рідини від твердих включень.
3. Сформульований математичний опис процесів сепарації частинок пилу в горизонтальному електрофільтрі та гідроциклоні дозволить розрахувати основні параметри переміщення твердих частинок в елементах осаджувальних пристроїв.

Список використаних джерел

1. Алиев Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справочник. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Страус В. Промышленная очистка газов. Пер. Косого Ю. Я. Москва: Химия, 1981. 616 с.
3. Котов Б. І., Грищенко В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. Моделювання процесу інерційної сепарації пилу під дією відцентрового та електричного поля в установках циклонного типу. Енергетика і автоматика. 2019. Вип. 6. С. 14–26.

4. Котов Б. І., Грищенко В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д., Калініченко Р. А. Підвищення ефективності трубчастих електрофільтрів застосуванням закручування потоку очищеного повітря. Енергетика і автоматика. 2020. Вип. 2. С. 123–136.
5. Шиляев М. И., Дорохов А. П. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования. Томск: Из-во ТТУ, 1999. 215 с.
6. Дудник А. О., Штепа В. М., Лисенко В. П. Нейромережева система керування електрогідроциклоном. Енергетика і автоматика. 2016. Вип. 2. С. 84–92.
7. Мартынов С. В., Мартынов Ю. В., Юречко В. Н. О сепарации частиц в прямоточном гидроциклоне. Москва: Ин-т пробл. механ. АН СССР, 1991. 34 с.
8. Василенко П. М. Об уравнениях транспортировки частиц в сопротивляющихся средах. Доклады ВАСХНИЛ. 1970. Вип. 4. С. 44–46.

References

1. Aliyev, G. M. (1986). Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov [Technique of dust removal and purification of industrial gases]. Moscow: Metallurgiya, 544.
2. Straus, V. (1981). Promyshlennaya ochistka gazov [Industrial gas cleaning]. Moscow: Khimiya, 616.
3. Kotov, B. I., Hryshchenko, V. O., Pansyr, Yu. I., Herasymchuk, I. D. (2019). Modeliuvannya protsesu inertiinoi separatsii pylyu pid diieiu vidtsentrovoho ta elektrychnoho polia v ustanovkakh tsyklonnoho typu [Modeling of the process of inertial separation of dust under the action of centrifugal and electric fields in cyclonic type installations]. Energy and automation, 6, 14–26.
4. Kotov, B. I., Hryshchenko, V. O., Pansyr, Yu. I., Herasymchuk, I. D., Kalinichenko, R. A. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti trubchastykh elektrofiltriv zastosuvanniam zakruchuvannia potoku ochyshchuvanoho povitria [Improving the efficiency of tubular electrostatic precipitators by twisting the flow of purified air]. Energy and automation, 2, 123–136.
5. Shilyayev, M. I., Dorokhov, A. R. (1999). Metody rascheta i printsipy komponovki pyleulavlivayushchego oborudovaniya [Calculation methods and principles of the arrangement of dust-collecting equipment: textbook]. Tomsk: TTU, 209.
6. Dudnyk, A. O., Shtepa, V. M., Lysenko, V. P. (2016). Neiromerezheva systema keruvannia elektrohidrotsyklonom [Neural network control system electrohydrocyclone]. Energy and automation, 2, 84–92.
7. Martynov, S. V., Martynov, Yu. V., Yurechko, V. N. (1991). O separatsii chastits v pryamotochnom gidrotsyklone [On the separation of particles in a straight-through hydrocyclone]. Moscow: Institute of Probl. mehan. Academy of Sciences of the USSR, 34.
8. Vasilenko, P. M. (1970). Ob uravneniyakh transportirovki chastits v soprotivlyayushchikhsya sredakh [On the equations of particle transportation in resisting media]. Reports of VASKHNIL, 4, 44–46.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРАХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И АГРЕГАТОВ

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

Аннотация. В настоящее время для создания микроклимата в производственных сооружениях агропромышленного производства широкое применение получили утилизаторы отработанной теплоты вентиляционных выбросов. Но воздух таких помещений засорен пылевыми примесями и имеет повышенное влагосодержание, в результате чего на теплопередающей поверхности выпадает конденсат, а на увлажненную поверхность налипают пыль.

В результате эффективность теплоутилизаторов существенно снижается, а гидравлическое сопротивление увеличивается, что может вызвать уменьшение подачи воздуха. Поэтому возникает потребность борьбы с запыленностью воздуха, подаваемого в теплоутилизаторы.

Наиболее распространенным методом очистки газовых потоков от твердых пылевых примесей является осаждение последних в электрофильтрах, для повышения эффективности которых применяют гравитационную подвижную водяную пленку.

В настоящее время отсутствуют математические описания и расчетные зависимости для горизонтальных электрофильтров и электрогидроциклонов.

Целью исследования является формулировка математического описания процессов перемещения твердых частиц в камерах горизонтального электрофильтра и электрогидроциклона.

Приведен анализ существующих систем теплоутилизации бросового воздуха и влияние запыленности на эффективность их использования. Рассмотрена возможность применения различных систем для очистки от пыли бросового воздуха в сооружениях агропромышленного производства. Предложенная технологически конструктивная схема электротехнологического комплекса утилизации теплоты вентиляционных выбросов, которая включает электрогидроциклон для очистки от пыли бросового воздуха. Проанализированы действия определяющих сил, в том числе и электрической, на движение частицы пыли во вращающемся потоке электрогидроциклона. Определены уравнения, описывающие движение частицы в воздушном вращающемся потоке при воздействии электрического поля, и составлены математические модели для расчета траектории движения частицы пыли. Приведены упрощенные аналитические выражения для траекторий движения частицы.

Ключевые слова: *пыль, сепарация, электрическое поле, циклон, воздушный поток*

ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEX FOR DEDUSTING VENTILATION EXHAUSTS HEAT RECOVERY UNITS IN PRODUCTION FACILITIES AND UNITS

B. Kotov, V. Hryshchenko, Yu. Pantsy, I. Herasymchuk

Abstract. *Currently, to create a microclimate in the production facilities of agro-industrial production are widely used utilizers of waste heat of ventilation emissions. But the air of such premises is clogged with dust impurities and has a high moisture content, as a result of which condensate falls on the heat-transfer surfaces, and dust sticks to the moistened surface.*

As a result, the efficiency of heat exchangers is significantly reduced, and the hydraulic resistance increases, which can cause a decrease in air supply. Therefore, there is a need to combat dust in the air supplied to heat recovery units.

The most common method of purification of gas streams from solid dust impurities is the deposition of the latter in electrostatic precipitators, to increase the efficiency of which use gravitational moving water film.

Currently, there are no mathematical descriptions and calculated dependences for horizontal electrostatic precipitators and electrohydrocyclones.

The aim of the study is to formulate a mathematical description of the processes of movement of solid particles in the chambers of the horizontal electrostatic precipitator and electrohydrocyclone.

The analysis of the existing systems of heat utilization of exhaust air and influence of dustiness on efficiency of their use is resulted. The possibility of using various systems for dust cleaning of exhaust air in agro-industrial facilities is considered. The technological and constructive scheme of the electrotechnological complex of utilization of heat of ventilating emissions which includes the electrohydrocyclone for clearing of dust of exhaust air is offered. The effect of determining forces, including electric, on the motion of a dust particle in the rotating flow of an electrohydrocyclone is analyzed. Equations describing the motion of a particle in an air rotating flow under the action of an electric field are determined, and mathematical models are compiled to calculate the trajectory of the dust particle. Simplified analytical expressions for particle motion trajectories are presented.

Keywords: *dust, separation, electric field, cyclone, airflow*