

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКІВ ЗЕРНОСЕПАРАТОРІВ В ПРЯМОТОЧНИХ ЦИКЛОНАХ

Котов Б. І.

Подільський державний аграрно-технічний університет

Степаненко С. П.

Національний науковий центр ННЦ «ІМЕСГ»

Грищенко В. О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Калініченко Р.А.

Ніжинський агротехнічний інститут Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведено аналіз досліджень процесів пилоочищення повітряних потоків в інерційних відцентрових сепараторах циклонного типу з прямоточним рухом двокомпонентних потоків (запиленого повітря). Визначено достатню ефективність і переваги цього типу пилловловачів для очищення повітряних потоків на виході пневморешітних сепараторів. Виконано аналіз існуючих математичних моделей циклонної сепарації пилу з різними спрощуваними розрахунковими припущеннями. На основі аналізу діючих сил на одиночну частинку у криволінійному потоці повітря сформульовані спрощені математичні моделі для розрахунку траєкторій руху частинки в координатах висота циклона – радіус, і радіус – кут переміщення частинки (полярних координатах).

За отриманими спрощеними розрахунками визначено і графічно проілюстровано траєкторії руху частинок різного розміру.

Ключові слова: *повітряний потік, пилоочистка, циклон, математична модель, траєкторія руху частинки.*

Постановка проблеми

Серед широкого розповсюджених інерційних пилловловачів у вітчизняній і закордонній практиці особливе місце займають циклони із зворотно-проточною схемою руху повітряного потоку. Такі апарати мають ряд позитивних властивостей, але їх застосування обмежено значними габаритами (висота 3-4 м) і значними питомими витратами енергії (завдяки високому аеродинамічному опору). Найбільш економічними апаратами в плані затрат енергії на очистку повітря, можливістю горизонтального компоновання в загальній схемі зерносепараторів є прямоточні циклони (з прямоточною схемою руху середовища). Існуючі не багаточисленні конструкції прямоточних циклонів мають відносно невеликий гідравлічний опір, а їх переваги використовуються не повністю. Недостатня практична реалізація прямоточної схеми роботи циклона може бути пояснена малим об'ємом виконаних досліджень, в тому числі і теоретичного спрямування. Відсутність спрощених методів визначення ефективності сепарації при порівнянні варіантів технічної реалізації апаратурного оформлення процесів пилоочищення повітряних потоків зерносепараторів стримує роботи по вдосконаленню прямоточних

циклонів в плані підвищення ефективності пиловловлювання багатofракційних дисперсних потоків.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз досліджень і публікацій показує, що незважаючи на значну ефективність, широку розповсюдженість пилоочисників циклонного типу і достатню вивченість гідродинаміки двофазних потоків у вихрових апаратах [1-4], роботам по вдосконаленню пиловловачів інерційного типу [5-9] і циклонів [9-13], приділяється достатньо уваги.

В попередніх роботах [1-3, 14], визначені фундаментальні основи гідродинаміки двофазних потоків у вихрових камерах сепараторів. В роботах [4-5] проведено детальний аналіз існуючих технічних засобів інерційного очищення повітряних потоків в зерносепараторах, визначено ефективність використання циклонних пиловловачів з обертальними пристроями [5-7]. В роботах [9, 11, 13] на основі теоретичних і експериментальних досліджень доведено можливості інтенсифікації пилоочиснення в прямоточних циклонах, шляхом удосконалення конструктивного виконання.

Питанням математичного опису процесів очищення повітряного потоку у вихрових циклонних апаратах присвячено достатня кількість останніх публікацій [4, 8, 11-13, 15]. Показано можливість теоретичного аналізу ефективності циклонів на основі рішення рівнянь сепарації частинок [12]. Математична модель циклонної сепарації складена на основі сумісного рішення рівнянь руху повітряного потоку і пилу з врахування усіх важливих сил, що діють на частку наведено в роботі [6]; в роботі [14] для визначення траєкторій частинок у вихровому потоці використано дещо спрощена математична модель. Запропоновані моделі є неоднорідні та нелінійні і не мають аналітичного розв'язку, тому їх реалізація можлива тільки чисельними методами з певними наближеннями [11], що утруднює розрахунки ефективності різних схем організації процесу сепарації на етапах проектування і дослідної експлуатації.

Мета роботи

теоретично дослідити процес сепарації частинок пиловидних__фракцій у прямоточному циклоні і визначити закономірності руху частинки на основі отриманих наближених компактних формул для розрахунку ефективності пиловловлювання.

Результати досліджень

Розглянемо повітряний циліндричний канал із закрученим повітряним потоком. Потік в циклоні закручується у вхідному пристрої виконаному у вигляді тангенціального вхідного патрубку рис. 1.

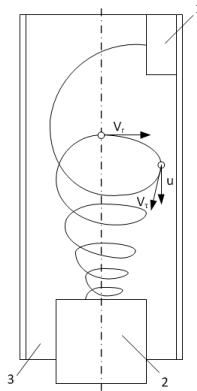


Рис.1. Схема прямоточного циклону: 1 – патрубок вводу матеріалу; 2 – патрубок відводу чистого повітря; 3 – вихід матеріалу (пил)

Для аналізу руху частинок пилу в рухомому обертovому (вихровому) середовищі, що складається з інерційних частинок і несучого повітряного потоку було прийнято такі припущення: частинки пилу є твердими, мають форму кулі та не взаємодіють між собою і поверхневими конструкціями циклона; вхід потоку в циклон тангенціальний і має рівномірне поле швидкості; аеродинамічний опір руху частинки описується законом Стокса; тангенціальна і осьова складова швидкості частинки і повітряного потоку співпадають; радіальні швидкості частинок є швидкістю осідання; частинка, яка досягає зовнішньої стінки циклону вважається вловленою (осадженою).

На частинку, що рухається в криволінійному закрученому потоці діють наступні сили:

- сила тяжіння: $\vec{F}_T = m\vec{g}$;
- сила Архімеда: $\vec{F}_a = m_o\vec{g}\mu$;
- сила Стоксовського опору: $\vec{F}_c = 3\pi d\vec{V}_c$;
- відцентрова сила: $\vec{F}_y = m\vec{\omega}(\vec{\omega}R)$;
- сила Коріоліса, (що викликає обертання частинки): $F_k = m\vec{\omega}\vec{V}_c$;
- сила, протитиску, що виникає за наявності градієнту тиску по радіусу циклона: $\vec{F}_n = m_o\vec{\omega}W_t$; яку можна оцінити за формулою [6], $\vec{F}_n = 3\pi\mu d \frac{\rho_o}{\rho} \vec{V}_c$.

Рівняння руху частинки з врахуванням діючих сил може бути записано у вигляді:

$$m \frac{d\vec{V}_c}{dt} = \sum F_i = \vec{F}_T + \vec{F}_a + \vec{F}_c + \vec{F}_y + \vec{F}_k + \vec{F}_n, \quad (1)$$

де $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho$ – маса частинки; $m_o = \frac{\pi d^3}{6} \rho_o$ – маса повітря в об'ємі частинки; W , ω – колова і кутова швидкість; d – діаметр частинки; ρ , ρ_o – густина матеріалу частинки і повітря; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря; V_c – швидкість переміщення частинки.

Проектуючи рівняння (1) на координатах $Oxyz$ (з урахуванням проєкцій):

$V_x = \frac{dx}{dt}$, $V_y = \frac{dy}{dt}$, $V_z = \frac{dz}{dt}$, де x , y , z – координати частинки під час руху) отримано математичну модель сепарації пилу в циклоні [6] в координатах трьохвимірного простору:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2x - \frac{1}{\tau} \frac{dx}{dt} - 2\omega \frac{dy}{dt} + 2\omega \frac{dz}{dt} - \frac{\rho_0}{\rho} \omega^2x, \\ \frac{d^2y}{dt^2} = \omega^2y - \frac{1}{\tau} \frac{dy}{dt} + 2\omega \frac{dx}{dt} - 2\omega \frac{dz}{dt} - \frac{\rho_0}{\rho} \omega^2y, \\ \frac{d^2z}{dt^2} = g \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) - \frac{1}{\tau} \frac{dz}{dt} + 2\omega \frac{dx}{dt} - 2\omega \frac{dy}{dt} + \frac{\rho_0}{\rho} \omega^2z, \end{cases} \quad (2)$$

де $\tau = \frac{d^2\rho}{18\mu}$ – час релаксації; початкові умови: $t = 0$; $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, $z(0) = z_0$, $dx/dt = dy/dt = dz/dt = 0$.

Система рівнянь нелінійна та неоднорідна, немає аналітичного розв'язку. Реалізація моделі здійснена наближенням числовим методом в роботі [6].

Для аналізу руху частинок пилу в установках циклонного типу, із-за складності фізичного процесу, припустимо використання спрощених модельних уявлень. Так в практиці досліджень осадження дрібно дисперсних домішок в закручених потоках прийнято вважати, що в тангенціальному напрямку частинка рухається разом з потоком повітря, тому розглядаються тільки сили, які діють в радикальному напрямку. Враховуючи, що сили тяжіння, Архімеда, протитиску мають значення в десятки разів менші [2] за відцентрову силу іншими величинами можна знехтувати отримано математичну модель [1] руху частинки у вихровому потенційному потоці в полярних координатах.

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$r^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2r \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{r^2}{\tau} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{k}{\tau} = 0 \quad (4)$$

де φ – кутова координата переміщення частинки $k = rV_\tau$; V_τ – тангенціальна колова швидкість.

Систему (3) і (4) слід доповнити рівнянням вертикального переміщення частинки:

$$\frac{d^2z}{dt^2} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{dz}{dt} - u\right). \quad (5)$$

Система рівнянь, що описує рух частинки у вихровому потоці повітря дозволяє розрахувати траєкторії руху (за початкових умов: $t = 0$, $\varphi = 0$, $r = r_0$, $Z = 0$, $d\varphi/dt = dr/dt = 0$) при використанні комп'ютерних програм.

Для отримання спрощених аналітичних залежностей, що визначають траєкторії руху частинки в першому наближенні виключимо, Кориолісове прискорення [16] і враховуємо тільки дві сили: відцентрову і опору середовища. Тоді рівняння (1) запишемо у вигляді:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho \frac{V^2}{\tau} - 3\mu \frac{6}{\pi d^2} V, \quad (6)$$

або враховуючи, що $V_\tau = r\omega$, $V = \frac{dr}{dt}$:

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{dr}{dt} - \omega^2 r = 0. \quad (7)$$

Таке рівняння використовують в роботах [1,15,16] для визначення мінімального (практичного) розміру частинки, що може досягти стінки циклона.

Розв'язок рівняння (7) відомий:

$$r(t) = C_1 e^{\gamma_1 t} + C_2 e^{\gamma_2 t}, \quad (8)$$

де $\gamma_{1,2} = 0.5[-k^2 \pm \sqrt{k^2 - 4\omega^2}]$ – корені характеристичного рівняння: $k = \tau^{-1}$.

Сталі інтегрування C_1, C_2 визначені з початкових умов: $t = 0$, $r = r_1$, $\frac{dr}{dt} = 0$ (де r_1 – початкова координата місця вводу частинки в циклон): $C_1 = -r_1 \frac{\gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2}$; $C_2 = r_1 \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2}$.

Загальний розв'язок запишемо у вигляді:

$$r(t) = \frac{r_1}{\gamma_1 - \gamma_2} (\gamma_1 e^{\gamma_2 t} - \gamma_2 e^{\gamma_1 t}). \quad (9)$$

Рівняння (9) визначає зміну переміщення частинки за часом в радіальному напрямку.

Переміщення частинки в осьовому напрямку (0z) під дією вісьової складової швидкості повітря можна визначити з рівняння:

$$dz = u dt. \quad (10)$$

Величина осьової швидкості є змінною за радіусом $u_z = u(r)$. Розподіл осьової швидкості за радіусом кільцевого перетину можна визначити за емпіричною формулою, отриманою з експериментів в прямоточному циклоні [13]:

$$\frac{u}{u_0} = 0.4 + 1.6 \left(\frac{r}{R}\right) - 0.6 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \pm 0.2, \quad (11)$$

де $\frac{u}{u_0}$ – відносна осьова швидкість в закрученому потоці в циліндричній трубі з тангенціальним впуском.

R – радіус циклона.

Відповідно до графіку залежності $(u/u_0) = f(r/R)$ наведеної в [13] її можна з певною точністю апроксимувати лінійною залежністю у вигляді:

$$\frac{u}{u_0} = a + \frac{r}{R} b, \quad (12)$$

де $a = 0.47$; $b = 1.05$.

З урахуванням (12) рівняння (10) можна записати у вигляді:

$$dz = (a' + b' \bar{r}(t)) dr, \quad (13)$$

де $a' = a u_0$; $b' = b u_0$; $\bar{r}(t) = \frac{r(t)}{R}$; і враховуючи залежність (9) матимемо після інтегрування при початкових умовах: $\tau = 0$; $z = 0$:

$$z(t) = a' t + A \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (1 - e^{\gamma_1 t}) - A \frac{\gamma_1}{\gamma_2} (1 - e^{\gamma_2 t}), \quad (14)$$

де $A = \frac{r_1}{R} \frac{b'}{\gamma_1 - \gamma_2}$.

Рівняння (14) визначає залежність проекції вертикального переміщення частинки від часу руху.

Для розрахунку і побудови траєкторії руху частинки в прямоточному циклоні (в координатах 00z) необхідно для кожного моменту часу t_i ; на які умовно розділено час перебування частки в циклоні визначити за рівняннями (9) і (14) координати частинки r_i та z_i і побудувати графічну залежність між координатами $r = f(z)$ тобто траєкторію переміщення частки в координатах 00z.

Траєкторію руху частинки в поперечному перетині циклона розглянемо в полярній системі координат. В цій системі координат траєкторія руху частинки визначається залежністю радіальної координати (радіуса (r) від полярного кута (φ); $r = f(\varphi)$.

Залежність радіусу руху частинки r від часу $r(t)$ замінимо залежністю радіусу руху від полярного кута $r(\varphi)$, яку визначимо з кінетичного рівняння [3].

$$\frac{du}{dt} = \frac{u_\varphi}{r}, \quad (15)$$

де u_φ – колова швидкість частки в потенційному обертальному потоці повітря $u_\varphi = \omega R$, $\frac{dr}{dt} = \omega \frac{dr}{d\varphi}$.

Таким чином, з урахуванням (15) рівняння (7) набуває вигляду:

$$\frac{d^2 r}{d\varphi^2} + k \frac{dr}{d\varphi} - \frac{\omega}{z} r = 0. \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (16) за початкових умов $\varphi = 0$; $r = r_1$ (r_1 – місце вводу частинки в циклон):

$$r(\varphi) = C'_1 e^{\gamma'_1 \varphi} + C'_2 e^{\gamma'_2 \varphi}, \quad (17)$$

де $\gamma'_{1,2} = 0.5[-k \pm \sqrt{K_c^2 - 2\omega}]$ – корені характеристичного рівняння;

$$C'_1 = r_0 \gamma'_2 / (\gamma'_1 - \gamma'_2); \quad C'_2 = r_0 \gamma'_1 / (\gamma'_1 - \gamma'_2).$$

Отримане рівняння (17) описує траєкторію руху частинки обертальному потенціальному потоці навколо осі циклону. Це дозволяє визначити кількість обертів частинки (двофазного) потоку n і за формулою [1]:

$$d_{min} = 3 \sqrt{\frac{\mu}{\pi \cdot \omega \cdot \rho \cdot n}}, \quad (18)$$

розрахувати мінімальний (критичний) розмір частинок, які досягли стінки циклону, тобто вважаються вловленими.

На рисунках 2–3 наведені, як приклад траєкторії руху частинок в потенціальному обертальному потоці циліндричного циклона (навколо (а) і вздовж (б) осьової лінії циклону.

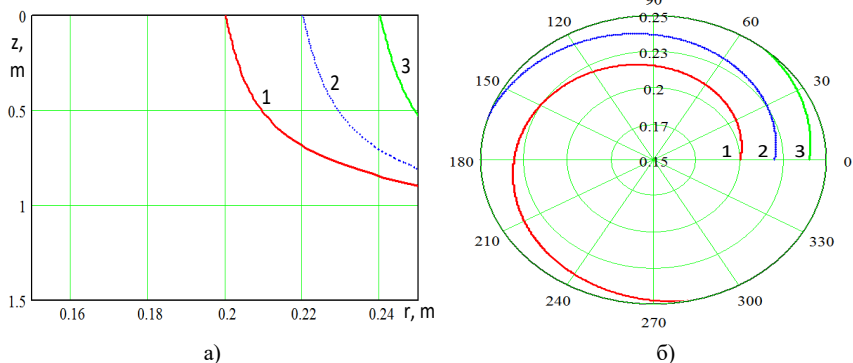


Рис.2. Траєкторії руху частинок однакового розміру в циклоні: 1) $r_1 = 0.2$ м; 2) $r_2 = 0.22$ м; 3) $r_3 = 0.24$ м

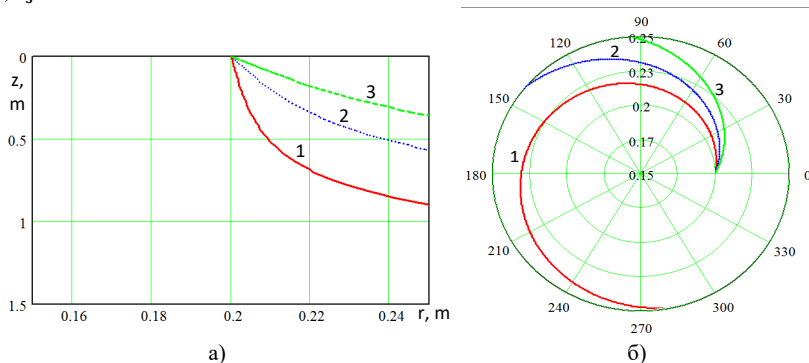


Рис. 3. Траєкторії руху частинок різного розміру в циклоні: 1) $d_1 = 30$ мкм; 2) $d_2 = 50$ мкм; 3) $d_3 = 100$ мкм

Висновки

1. Проведеним теоретичним аналізом руху однієї частинки у вихровому повітряному потоці прямого циклона отримані спрощені аналітичні залежності які можна використовувати для траєкторного аналізу і визначення ефективності циклонів.

2. Отримані залежності дозволяють визначити конструктивні і режимні параметри циклона які забезпечують ефективне знепилювання повітряного потоку.

Список використаних джерел

1. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981 – 296 с.
2. Степанов, Георгий Юрьевич Инерционные воздухоочистители / Г. Ю. Степанов, И. М. Зицер. – Москва : Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. Зверев Н. И. О движении твердой частицы в потенциальном вращающемся потоке / Н. И. Зверев, С. Г. Ушаков // ИФЖ. – 1968. - Т.14, № 1. - С. 90-93.
4. Батлук В. А. Підвищення ефективності вловлення дрібнодисперсних фракцій пилу в системах очистки повітря від пилу деревообробних підприємств / В. А. Батлук, Р. М. Василів, Р. Є. Стець // Промислова гідравліка і пневматика. - 2012. - № 4. - С. 43-49.
5. Харченко С.А. Обоснование параметров процесса очистки воздушного потока пылесоса камерой виброцентробежных зерновых сепараторов: дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / С.А. Харченко. – Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенко, 2007. – 230 с.
6. Харченко С.О. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин / С.О. Харченко, Е.А. Гаек // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип.135. – С.87 - 92.
7. Стоянов Н.И. Исследование циклонных пылеуловителей с неподвижными и вращающимися устройствами / Н. И. Стоянов. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Киев (КПИ) 1981 – с. 21.
8. Куц В. П. Науково-практичні основи створення високоефективного пилоочисного обладнання комбінованої дії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Куц В. П.; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2015. – 40 с.
9. Гаврилів Р. І. Дослідження ефективності прямооточних циклонів: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08 / Гаврилів Р. І.; Національний ун-т "Львівська політехніка". – Л., 2005. – 19 с.
10. Платов В.Д. Исследование сухого пылеуловителя с прямооточным вихревым пылеконцентратором /В. Д. Платов. Автореф. дис. канд. техн. наук Киев. (КИСИ) 1981–20 с.
11. Мартынов С.В., Мартынов Ю.В., Юречко В.Н. О сепарации частиц в прямооточном гидроциклоне. М., Ин-т пробл. механ. АН СССР, 1991. –34 с.
12. Веремеенко М. В. Анализ эффективности циклона на основе решения уравнения сепарации частиц /М. В. Веремеенко //Збірник наук праць Луганського національного аграрного університету. 2005 № 44 (56). С.72–76.
13. Косенко Н. О. Очистка вентиляционных выкидов у вихрових прямооточних апаратах: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.03 / Н.О.Косенко ; Харківський держ. технічний ун-т будівництва та архітектури. - Х., 2004. - 20 с.
14. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир, 1971. – 536 с.

15. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и оптимальной компоновки пылеулавливающего оборудования: Учебное пособие. Томск: Издательство ТГАСУ, 1999.- 209с.
16. Потапов О.П., Кропп Л.Д. Батарейные циклоны. – М.: Энергия, 1977. – 152 с.

Аннотация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ЗЕРНОСЕПАРАТОРОВ В ПРЯМОТОЧНЫХ ЦИКЛОНАХ

Котов Б.И., Степаненко С.П., Грищенко В.В., Калининченко Р.А.

Проведен анализ исследований процессов пылеочистки воздушных потоков в инерционных центробежных сепараторах циклонного типа с прямоточным движением двухкомпонентных потоков (запыленного воздуха). Определены достаточную эффективность и преимущества этого типа пылеуловителей для очистки воздушных потоков на выходе пневморешетчатых сепараторов. Выполнен анализ существующих математических моделей циклонической сепарации пыли с различными упрощающими расчетными предположениями. На основе анализа действующих сил на одиночную частицу в криволинейном потоке воздуха сформулированы упрощенные математические модели для расчета траекторий движения частицы в координатах высота циклона - радиус, и радиус - угол перемещения частицы (полярных координатах).

По полученным упрощенным расчетам определены и графически проиллюстрированы траектории движения частиц разного размера.

Ключевые слова: воздушный поток, пылеочистка, циклон, математическая модель, траектория движения частицы.

Abstract

MODELING OF THE CLEANING PROCESS OF AIR GRAIN FLOWS IN DIRECT CYCLES

B.Kotov, S.Stepanenko, V.Grishchenko, R.Kalinichenko

An analysis of studies of dust cleaning processes of air flows in inertial centrifugal cyclone-type separators with direct-flow motion of two-component flows (dusty air) is carried out. Sufficient efficiency and advantages of this type of dust collectors for cleaning air flows at the outlet of pneumatic separators are determined. The analysis of existing mathematical models of cyclonic dust separation with various simplifying design assumptions is performed. Based on the analysis of the acting forces on a single particle in a curved air flow, mathematical models are simplified to calculate the particle trajectories in coordinates, the cyclone height is the radius, and radius is the particle angle of movement (polar coordinates).

Based on the obtained simplified calculations, the trajectories of motion of particles of different sizes are determined and graphically illustrated.

Keywords: air flow, dust cleaning, cyclone, mathematical model, particle trajectory.