

У статті розглянуті закономірності руху твердих частинок, газу і конструктивні способи інтенсифікації процесу сепарації в протиточних циклонах. Запропоновані універсальний метод розрахунку ефективності пилоловлювання циклонів і метод оцінки ефективності протиточних циклонів

Ключові слова: циклон, протиточний циклон, ефективність пилоловлювання, сепарація

В статье рассмотрены закономерности движения твердых частиц, газа и конструктивные способы интенсификации процесса сепарации в противоточных циклонах. Предложены универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов и метод оценки эффективности противоточных циклонов

Ключевые слова: циклон, противоточный циклон, эффективность пылеулавливания, сепарация

There are the regularities of particulate matter and gas motion under consideration in this article, as well as separation process intensification design methods in counterflow cyclones. The universal method of cyclones dust collecting efficiency estimation and method of counterflow cyclones efficiency estimation

Key words: cyclone, counterflow cyclone, efficiency estimation, separation

ИЗВЛЧЕНИЕ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ИЗ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ЦИКЛОНЕ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ ПОДВОДОМ

С.В. Плашихин

Аспирант*

Контактный тел.: (093) 393-72-01

E-mail: plashihin@rambler.ru

Ю.А. Безносик

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: (044) 406-76-12

E-mail: yu_beznosyk@ukr.net

*Кафедра кибернетики химико-технологических процессов

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Перемоги, 37, Киев, Украина, 03056

Д.А. Серебрянский

Кандидат технических наук, научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

ул. Желябова, 2а, Киев, Украина, 03057

Контактный тел.: (044) 453-28-91

E-mail: fordima@ukr.net

1. Введение

Технические, экономические или технологические разработки, направленные на повышение эффективности циклонов невозможны без изучения гидродинамических особенностей процесса осаждения частиц и их движения во вращающемся потоке газа. Создание математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке позволит оценить эффективность пылеулавливания и выявить влияющие на нее факторы.

Рассмотрим извлечения твердой фазы из газовой среды в циклоне с тангенциальным подводом воздуха. В циклоне с тангенциальным подводом воздуха процесс извлечения твердой фазы из газовой среды происходит следующим образом. Подлежащий очистке воздух (или иной газ) движущегося по окружности вокруг оси циклона. Твердые частицы более высокой плотности, чем газ, под действием центробежной силы инерции смещаются к внешней стенке циклона.

Центробежное ускорение в циклоне во много раз больше ускорения свободного падения. Вследствие чего даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за линиями тока газов и под влиянием центробежной силы выносятся из кривой движения газов по направлению к стенке.

При рассмотрении центробежного эффекта сепарирования будем считать уловленными частицы, достигшие внешней (наружной) стенки циклона или внешней стенки секции, если циклон разделен на секции с криволинейными каналами.

2. Постановка проблемы

Процесс сепарации частиц пыли рассмотрим как совокупность движения одиночных частиц в потоке, движущихся по окружности в канале с твердой наружной стенкой с радиусом кривизны R . Опишем ра-

диальное смещение частицы в циклоне. При движении потока в циклоне режим течения газа является турбулентным. Режим движения характеризуется величиной числа Рейнольдса, вычисленному по внешним параметрам потока:

$$Re = \frac{v_T D_K}{\nu} \tag{1}$$

где ν - кинематическая вязкость газовой среды, v_T - тангенциальная скорость газового потока, D_K - диаметр канала (выхлопной трубы).

При расчете величины числа Рейнольдса для скоростей потока от 3 до 18 м/с (характерных для циклонов) получаем $Re \geq 10^5$, в то время как режим развитой турбулентности наступает при $Re \geq 10^4$.

3. Моделирование процесса очистки газов

Для возможности анализа количества уловленных частиц аэрозоля, необходимо определить величину радиального (поперечного к оси вращения потока) смещения твердой частицы при движении по кольцевому каналу. Для анализа поведения аэрозольных частиц необходимо рассмотреть поведение одиночной частицы под действием всех сил (рис. 1).

В связи с тем, что плотность частицы ρ_s много больше плотности воздуха, частица, попадая в циклон с некой скоростью входящего потока, по инерции стремится двигаться равномерно и прямолинейно (рис. 1, траектория 1), отклоняется при этом от оси циклона в сторону его внешней стенки (рис. 1, траектория 2). Согласно принятым допущениям, тангенциальная составляющая скорости частицы v_T равна скорости потока. Радиальному смещению частицы со скоростью v_R препятствует сила сопротивления среды. Сила сопротивления движению частицы вычисляется по формуле Стокса:

$$F_c = 3\pi\mu v_R d, \tag{2}$$

где μ - динамическая вязкость газовой среды, v_R - радиальная составляющая скорости частицы, d - диаметр частицы.

В результате частица движется по криволинейной траектории (рис. 1, траектория 2 и 3). Очевидно, что чем меньше масса и чем больше вязкость газа (а, следовательно, и инерция) частицы, тем ближе ее траектория будет к окружности (рис. 1, траектория 3).

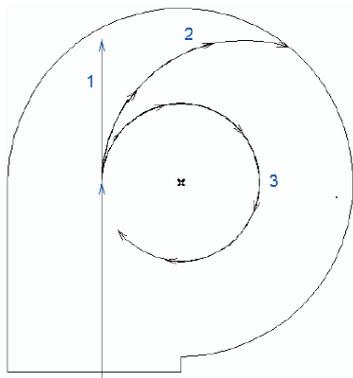


Рис. 1. Траектории движения частиц

Криволинейной траектории движения частицы соответствует сила центростремительного ускорения

$$F_{\text{ч}} = \frac{\pi}{6} \cdot R_{\text{ч}}^2 \cdot v_{\text{ч}}^2 \cdot \rho d^3, \tag{3}$$

где ρ - плотность частицы, v_T - тангенциальная составляющая скорости частицы, $R_{\text{ч}}$ - радиус кривизны траектории частицы.

Поскольку сила сопротивления является единственным источником центростремительного ускорения частицы, то, приравнявая $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{с}}$, получаем

$$\frac{\pi}{6} \cdot \frac{v_T^2}{R_{\text{ч}}} \cdot \rho_s d^3 = 3\pi\mu d v_R \tag{4}$$

Можно предположить, что, по прошествии некоего пути в циклоне, частица движется в радиальном направлении с постоянной скоростью. Тогда эта скорость определится как:

$$v_R = \frac{v_T^2}{18 \cdot R_{\text{ч}}} \cdot \frac{\rho_s d^2}{\mu} \tag{5}$$

Возможность применять формулу Стокса для этого расчета подтверждается при вычислении числа Рейнольдса по диаметру частиц:

$$Re_{\text{ч}} = \frac{v_R d}{\nu}, \tag{6}$$

где ν - кинематическая вязкость газовой среды, d - диаметр частицы.

Для частиц максимального размера из рассматриваемых (диаметра частиц 100 мкм) по формуле 2 вычисляем значение числа Рейнольдса. Полученное значение число Рейнольдса $Re = 13$. При теоретических расчетах аналитическая формула Стокса для силы сопротивления движению шарообразной частицы в газовой среде верна для чисел Рейнольдса меньше 0,1, однако при решении практических задач, допускается применение закона Стокса, если число Рейнольдса приближается к 10, т.к. несовпадение аналитической формулы Стокса с экспериментальными данными не превышает 20% (рис. 2).

Следовательно, для вычисления силы, с которой среда сопротивляется радиальному смещению частицы, можно применять формулу Стокса. Частица движется по криволинейной траектории с радиусом кривизны $R_{\text{ч}}$. Для определения пути, пройденного за время T , принимаем траекторию частицы за окружность радиусом $R_{\text{ч}}$, с центром, совпадающим с осью циклона.

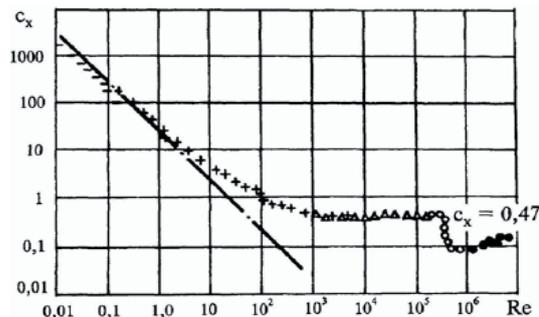


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления шара от числа Re , а также влияние условий опыта на величину c_x в районе $Re_{\text{кр}}$

Тогда время, за которое частица пройдет расстояние вдоль окружности равное $L = \pi R_{\text{ч}}$, равно:

$$T = \frac{L}{v_T} = \frac{\pi R_{\text{ч}}}{v_T} \quad (7)$$

За это время частица изменит свое положение и в радиальном направлении, т.е. сместится от центра циклона.

Для вычисления радиального смещения частицы необходимо удостовериться в том, что время релаксации частиц, время за которое частица приобретает скорость переносящего ее газового потока, много меньше, чем время T, за которое частица сместится к стенке циклона под действием силы центробежного ускорения. Время релаксации частицы t вычисляется по формуле

$$t = \frac{w}{g}, \quad (8)$$

т.к. рассматриваемые частицы находятся в диапазоне, где верна формула Стокса. Таким образом, должно выполняться условие:

$$t \ll T \quad (9)$$

Согласно 7 и 8 получаем:

$$\frac{w}{g} \ll \frac{\pi R_{\text{ч}}}{v_T} \quad (10)$$

Если условие выполняется можно вычислить радиальное смещение частицы. При проверке выполнения условия 9 для частиц максимального размера (диаметр частицы равен 100 мкм, гидравлическая крупность, т.е. скорость осаждения частиц под действием силы тяжести составляет $w = 0.7$) время релаксации частиц вычисленное по формуле 8 не превышает 0,01. Это намного меньше значения времени, за которое частица сместится к стенке циклона. Т.е. условие 8 выполняется.

Смещение частицы в радиальном направлении за время T будет равно:

$$\Delta = v_R T = v_R \frac{\pi R_{\text{ч}}}{v_T} \quad (11)$$

С учетом 5 получим выражение

$$\Delta = \frac{v_T^2}{18 \cdot R_{\text{ч}}} \rho \frac{d^2}{\mu} \frac{\pi R_{\text{ч}}}{v_T} \quad (12)$$

Рассмотрим криволинейное течение в канале, образованном двумя концентрическими поверхностями. Такое течение является частным случаем вращения потока или вихря (рис. 2). Степень очистки газа в пылеуловителе определяют коэффициента улавливания (захвата) взвеси, т.е. процентным отношением концентрации пыли до $C_{\text{вх}}$ и после пылеуловителя $C_{\text{вых}}$. Данное отношение можно расценивать, как отношение количества частиц, выпавшего в бункер циклона, к общему количеству частиц:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Как было упомянуто выше, уловленными можно считать частицы, достигшие внешней стенки секции. Из движущихся в потоке частиц наибольшее расстояние в радиальном направлении пройдет частица, которая при входе в циклон находилась вблизи выхлопной трубы, т.е. вблизи внутренней стенки канала (т.к. рассматривается движение частиц по концентрическим секциям). Чтобы такую частицу можно было считать уловленной, ей необходимо пройти расстояние $(R_2 - R_1)$, где R_1 – внутренний радиус цилиндрической поверхности ограничивающей канал, R_2 – внешний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал (рис. 3).

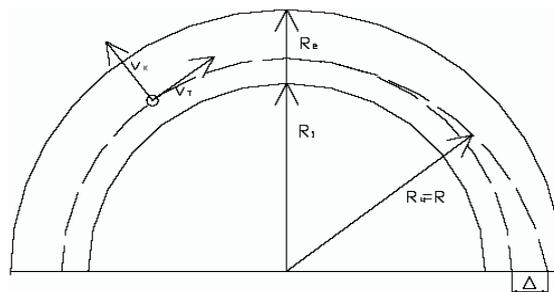


Рис. 3. Движение одиночной частицы по окружности при течении газового потока в концентрическом канале

Радиальное смещение частиц вычисляется по формуле 12. Рассмотрим участок, единичной ширины. Поскольку, согласно принятым допущениям, частицы распределены по всему сечению равномерно, процентное же отношение всех уловленных на данном участке частиц, т.е. частиц достигших наружной ограничивающей поверхности к их общему количеству вычисляется так:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{R_2 - R_1} \cdot 100\% \quad (14)$$

Подставим в формулу 14 значение Δ из формулы 12:

$$\varepsilon = \frac{\pi \rho v_T d^2}{18 \mu (R_2 - R_1)} \cdot 100\% \quad (15)$$

Полученная формулы позволяет выявить факторы, от которых зависит эффективность улавливания пыли в циклонных аппаратах.

4. Выводы

Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволило нам оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в циклонах, а также создать методику оценки эффективности пылеуловителя. Также данная модель дает возможность расчета радиального инерционного смещения частицы.

Разработанные методы оценки эффективности циклона могут быть использованы для определения целесообразности внедрения циклона в серийное производство, а также выявление технологической области для его наиболее рационального применения. Созданная программа расчета эффективности циклона позволяет увеличить точность расчета, таким образом, возможно практическое увеличение эффективности очистки воздуха от пылевидных частиц.

Литература

1. Коузов, П.А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности [Текст] / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин – Л.: Химия, 1993. – 320 с.
2. Шиляев, М. И. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямочных циклонов [Текст] / М. И. Шиляев, А. М. Шиляев, П. В. Афонин, Н. А. Стрельникова // Изв.вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. – 1999.- №8.
3. Штокман, Е.А. Очистка воздуха [Текст] / Е.А. Штокман – М.: АСВ, 1998. – 320 с.