УДК 697.98:666.972.12

О ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИНЕРЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМЗИТА

[1]Кисленко Т.А., [1]Кошкарев С.А., [2]Сидякин П.А., [2]Еремян С.П.

[1]ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», Волгоград, Россия (400074, Волгоград, ул. Академическая, 1)
[2]ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорск, Россия (357500, Пятигорск, ул. 40 лет Октября, 56)

Движение пылегазового потока в центробежных пылеуловителях определяется весьма сложным совместным действием ряда неоднородных, нестационарных во времени и пространстве сил. В общем случае решение задачи математического описания гидродинамики частиц, движущихся в потоке газа в циклоне, в виде конечных функций получить не представляется возможным. Для решения задачи описания движения частиц пыли в закрученном потоке под действием центробежной силы и силы тяжести, наиболее существенно влияющих на движение частиц в различного рода аппаратах “циклонного типа” (циклоны, прямоточные циклоны, ротоклоны, центробежные скрубберы и т.п.), приходится принимать целый ряд допущений, упрощающих реальную физическую сущность процесса. В работе была предпринята попытка учета некоторых основных факторов, определяющих значения диаметров частиц, которые могут улавливаться в аппаратах «циклонного типа», и оказывающих влияние на эффективность сепарации частиц пыли в устройствах очистки вентиляционных выбросов. Полученные решения показывают пути совершенствования конструктивных решений циклонов, прямоточные циклонов, ротоклонов и т.п. устройств, позволяющих улавливать частицы пыли необходимых размеров, определяемых по результатам дисперсного анализа, в том числе, например, в производстве керамзита. При этом достигаются высокие степени очистки вентиляционных выбросов.

Ключевые слова: пылеулавливание, инерционные аппараты, эффективность, пыль, диаметр частиц, дисперсный анализ, керамзит.

THE BASIC SIGNIFICANCE OF PARAMETERS OF INERTIAL DEVICES CLEANING VENTILATION EMISSIONS IN CLAYDITE MANUFACTURING

[1]KislenkoT.A., [1]Koshkarev S.A., [2]Sidyakin P.A.,[2]Eremyan S.P.

[1]Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE), 1 Akademicheskaya Street, 400074, Volgograd, Russia)
[2]North-Caucasus Federal University, Pjatigorsk, Russia, (357500, Pjatigorsk, str. 40 let Oktjabrja 56)

Movement dust and gas flow centrifugal inertial apparatuses are determined by very complex joint action of a several non-homogeneous, variable forces in time and space. In the general case the solution of the mathematical description of the hydrodynamics of particles moving in a gas stream in a cyclone in the form of finite functions is not possible to get. To solve the problem of describing the movement of the dust particles in the swirling flow under the effect of centrifugal force and gravity is very difficult task. The most significant influence on the motion of particles in different kinds of inertial apparatuses "cyclone types" (cyclones, VZP, centrifugal scrubbers and etc.) have taken a numerous of assumption’s approaches, having simplifying the real physical nature of the process. It was made an attempt taking into consideration some basic significance of factors to determine probability to separate dust particles with certain dimension’s diameters in the inertial apparatuses "cyclone types" in this article. Furthermore size dimensions (diameter) of the particles are containing in the air emissions affect on the separation’s summary efficiency of cleaning devices. There are obtained solutions indicate ways to improve design solutions for cyclones VZP, scrubbers and etc. devices in this article. These results allow to get dimension of dust particle sizes - diameters to capture dust particles as dependence of some parameters of inertial apparatuses (cyclones). These results could be applied for expanded clay and other different kinds of dust yielding in production of building materials to achieve the high efficiency cleaning of emissions.

Keywords: dust separation, inertial devices, efficiency, dust, particle diameter, dispersed analysis, clay.

Введение

Движение пылегазового потока в центробежных пылеуловителях определяется весьма сложным совместным действием ряда неоднородных, нестационарных во времени и

пространстве сил. В общем случае решение задачи математического описания гидродинамики частиц, движущихся в потоке газа в циклоне, в виде конечных функций не представляется возможным. Нами рассматриваются вопросы движения обеспыливаемого потока в центробежных пылеуловителях и зависимости, позволяющие установить аналитическую связь между минимальным размером отделяемых частиц и расстоянием до наружной поверхности кольцевой циклонной камеры аппарата. В работе была предпринята попытка учета некоторых основных факторов, определяющих значения диаметров частиц, которые могут улавливаться в аппаратах «циклонного типа», и оказывающих влияние на эффективность сепарации частиц пыли в устройствах очистки вентиляционных выбросов. Известным методом, часто применяемым в практике, является аксиоматическое принятие некоторых допущений, упрощений, приводящих весьма сложную реальную физическую картину процесса к более простой (двумерной, одномерной и т.п.) формализованной модели. Для решения задачи описания движения частиц пыли в закрученном потоке под действием центробежной силы и силы тяжести, наиболее существенно влияющих на движение частиц в различного рода аппаратах «циклонного типа» (циклоны, прямоточные циклоны, ротоклоны, центробежные скрубберы и т.п.), приходится принимать целый ряд допущений. Теоретический анализ проведенных исследований показывает, что при разработке тех или иных моделей таких процессов влияние силы Архимеда (подъемной силы), Кулоновской электростатической силы, возникающей, например, между частицами пыли и стенками циклона, сил трения при скольжении частиц пыли о стенки циклона ввиду их незначительного эффекта воздействия, как правило, не учитывается.

Результаты и их обсуждение

Изучению физико-математической стороны проблемы описания движения частиц пыли в закрученном потоке посвящены фундаментальные исследования, был решен ряд вопросов [2, 7, 9, 10]. Следует отметить, что в общем случае решение задачи математического описания гидродинамики частиц, движущихся в потоке газа в циклоне, в виде конечных функций (в квадратурах) получить не представляется возможным [9, 10]. Известен ряд работ, посвященных решению данной задачи, например, [1,3,8] численными методами (Рунге – Кутта и т.п.). Известным методом, часто применяемым в практике, является аксиоматическое принятие некоторых допущений, упрощений, приводящих весьма сложную реальную физическую картину процесса к более простой (двумерной, одномерной и т.п.) формализованной модели. При этом также не рассматривается вероятность «отскока» частиц от стенок циклона в результате взаимодействия – не упругого столкновения и их вторичного уноса очищаемым потоком газа. Движение пылегазового потока считается стационарным, изотропным (квазиоднородным) во времени и в любой точке пространственного объема

циклона (воздуховода). Предполагается также, что пылегазовой поток движется с некоторой усредненной скоростью по поперечному сечению, при отсутствии интенсивного турбулентного режима течения – и турбулентного переноса [2, 6]. Силой тяжести пренебрегают, так как ее значение в несколько раз меньше центробежных сил. При этом считается, что частицы уловленной пыли под действием силы тяжести двигаются («скользят») по поверхности стенки бункера циклона. В таких моделях также не учитывается взаимное влияние радиального стока и вторичных вихрей, возвращающих частицы к центру вращения, в том числе из нижней бункерной части циклона, как одного из наиболее важных потоков, возникающих в циклонах. В проведенном аналитическом исследовании предполагалось также, что центробежная сила инерции наиболее существенна и оказывает наиболее сильное действие на частицы пыли в радиальном направлении. Кроме того, принималось, что тангенциальные скорости частиц и среды в каждый момент времени равны между собой [4].

В общем случае, согласно закону Стокса, из условия доминирующего воздействия на частицы центробежных сил инерции и вязкого сопротивления среды величина центробежной силы инерции, действующей на частицы, определяется формулой:

$$P_{ц.б.} = m_ч\left[\vartheta_{r(u)}^2/R\right], \qquad (1)$$

где $m_ч$ – масса частиц, кг; $\vartheta_{r(u)}$ – тангенциальная скорость частицы, м/с; R – радиус вращения потока, м.

С учетом этого в настоящей работе принималось, что траектории движения частиц и потока газа отличаются незначительно. Тогда для частиц, подчиняющихся вязкому режиму обтекания в пограничном слое пристеночной области циклона, определяемому законом Стокса, параметр течения T, характеризующий частицы и не зависящий от времени их движения (инвариантный параметр) и определяющийся из условия однозначности, определяется [5] в виде соотношения:

$$T = \frac{2\,\delta m_ч}{K\mu F}, \qquad (2)$$

где K – коэффициент, зависящий от формы частицы, для частиц шарообразной формы K=24; F – площадь миделева сечения частиц, м^2.

Уравнение движения частицы в аксиальной проекции (на радиус кривизны) ее траектории с учетом величины силы вязкого сопротивления среды $m_ч\left[\vartheta_{r(p)}^2/R\right]$, что следует из (1), может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d\vartheta_{r(p)}}{dt} = \frac{1}{T}\left[\left(\frac{\vartheta_{r(p)}^2 T}{R} - \vartheta_{r(p)}\right)\right] = \frac{1}{T}\left(\vartheta_{r(p)max} - \vartheta_{r(p)}\right) \qquad (3)$$

Решение уравнения (3) при коаксиальном движении частицы с относительной скоростью $\vartheta_{r(p)}$в однородном потоке газа, при τ=0 и$\vartheta_{r(p)}$.=0 имеет следующий вид:

$$\vartheta_{r(p)} = \frac{\vartheta_{r(u)}^2 T}{R}(1 - \exp(1/T) = \vartheta_{r(p)max}(1 - \exp(1/T) \quad (4)$$

Длина пути частицы x при относительном движении составит:

$$x = \frac{\vartheta_{r(u)}^2 T}{R}(1 - \exp(1/T) = \vartheta_{r(p)max}(1 - \exp(1/T) \quad (5)$$

Параметр течения T, характеризующий частицы и имеющий постоянное значение по времени их движения, исходя из уравнения (5), стремится принять предельное значение $\vartheta_{r(p)max}$. Из этого можно сделать вывод, что эффективность улавливания, в том числе в прямоточных циклонах, может определяться величиной T, которая в общем случае определяется экспериментально для разных типов пыли.

В рассматриваемой модели течения двухфазного закрученного пылегазового потока механизм улавливания частиц пыли определяется условиями их соприкосновения с наружной поверхностью цилиндрической камеры аппарата [4]. Величина временного отрезка (минимальная), при которой частица касается наружной поверхности цилиндрической камеры, находящейся на расстоянии R_1 от оси вращения, должно быть меньше некоторого значения τ_0, за которое она пройдет путь l в осевом направлении.

Принимая за значение переменной x=R_1/R_2, где R_2 – радиус цилиндрической камеры (радиус кривизны кольцевой камеры), с учетом коэффициента формы частиц φ, при квазипостоянном значении осевой скорости движения частицы ϑ_0 и времени $\tau_0 = (l/\vartheta_0)$ получим условие улавливания частицы в прямоточных аппаратах циклонного типа:

$$\int_x^l \frac{x}{\varphi(x)dx} \leq \frac{L}{R_2}\frac{\vartheta_{r(u)}}{\vartheta_0}\cdot\frac{\vartheta_{r(u)}T}{R_2} \quad (6)$$

Для шарообразных частиц пыли при K= 24 уравнение (6) имеет вид:

$$\int_x^l \frac{x}{\varphi(x)dx} \leq \frac{1}{18}\frac{\vartheta_{r(u)}\delta^2\rho_2}{\vartheta_0\rho_1}\cdot\frac{\vartheta_{r(u)}l}{R_2^2} \quad (7)$$

Эффективность пылеулавливания в течениях прямоточных аппаратах циклонного типа определяется исходя из условия, что распределение тангенциальной скорости $w = \vartheta_0/R^\alpha$, все частицы, находящиеся в кольцевой зоне между R_1 и R_2, улавливаются с эффективностью η:

$$\eta_1 = 1 - \left[1 - 2\beta\frac{lT_l\vartheta_{r(u)}^2}{\vartheta_0 R_2^2}\right]^{1/\beta}, \quad (8)$$

где β=α+1.

По проведенным исследованиям и оценкам для целого ряда аппаратов инерционного типа, в которых улавливается пыль керамзита и пыль других строительных материалов, дисперсный состав которых с достаточной точностью для практических целей описывается усеченным нормально-логарифмическим распределением, в первом приближении значение коэффициента β=1,5.

Проведенный анализ позволил получить уточненную зависимость параметра течения T_l:

$$T_l = 2\beta \frac{R_2^2 \vartheta_0}{l \vartheta_{r(u)}^2} \tag{9}$$

Таким образом, можно считать, что частицы пыли с параметрами $T_l > T_1$ и $\delta_l > \delta_1$ будут улавливаться в прямоточных аппаратах циклонного типа с эффективностью η_1. Данную величину η_1 можно в первом приближении считать фракционной эффективностью, имеющую соответствующий интервал доверительной вероятности. С целью определения общей эффективности улавливания пылеуловителем η аналогичный расчет следует провести для всех фракций частиц, – фракционной эффективности улавливания η_i с параметрами течения $T_l \in [T_1, T_2, T_3, \ldots T_i]$. При этом дисперсный, фракционный состав определяется на основе дисперсного анализа пыли. Получаемое интегральное распределение частиц D_i является основой расчета как фракционной, так и, следовательно, общей эффективности улавливания. Уточненное решение уравнения (7) для шарообразных частиц диаметром δ_i и плотностью $\rho_ч$ имеет следующий вид:

$$\eta_1 = 1 - \left[1 - \beta \frac{L \delta_1^2 \vartheta_{r(u)}^2}{9 \nu \vartheta_0 R_2^2} \frac{\rho_ч}{\rho_1}\right]^{1/\beta} \tag{10}$$

Диаметр частиц, которые потенциально могут улавливаться, определяется по уравнению:

$$\delta_1 = R_2 \sqrt{\frac{9\ \vartheta_0 \rho_ч \nu_ч}{\beta \vartheta_{r(u)}^2 \rho_1 L}} \tag{11}$$

При этом для увеличения суммарной эффективности пылеулавливания целесообразно применять, например, двухступенчатую систему пылеулавливания аппаратами инерционного типа с различными радиусами R_{2I} и R_{2II} , соответственно первой и второй ступени очистки пылегазового потока (диаметрами d_{2I} и d_{2II}). Этот же принцип может применяться, когда целесообразно использовать один двухступенчатый пылеуловитель инерционного типа также с различными радиусами R_{2I} и R_{2II} (диаметрами d_{2I} и d_{2II})

цилиндрических или кольцевых сепарационных зон аппарата. В этом случае выражение (10) при β=3/2 эффективности пылеулавливания первой и второй ступени очистки примет вид:

$$\eta_{1I} = 1 - \left[1 - \frac{L\delta_{1I}^2 \vartheta_{r(u)}^2}{6\nu\vartheta_0 R_{2\,I}^2}\frac{\rho_ч}{\rho_1}\right]^{2/3} \quad (12)$$

$$\eta_{1II} = 1 - \left[1 - \frac{L\delta_{2II}^2 \vartheta_{r(u)}^2}{6\nu\vartheta_0 R_{2\,II}^2}\frac{\rho_ч}{\rho_1}\right]^{2/3} \quad (13)$$

Диаметр частиц, которые потенциально могут быть уловлены, соответственно в первой и второй ступени очистки, имеет вид:

$$\delta_{1I} = R_{2I}\sqrt{\frac{6\,\vartheta_0\rho_ч\nu_ч}{\vartheta_{r(u)}^2\rho_1 L}} \quad (14)$$

$$\delta_{2II} = R_{2II}\sqrt{\frac{6\,\vartheta_0\rho_ч\nu_ч}{\vartheta_{r(u)}^2\rho_1 L}} \quad (15)$$

Суммарная эффективность пылеулавливания η при последовательно установленных аппаратов первой и второй ступенях очистки имеет вид:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{1I})(1 - \eta_{1II}) \quad (16)$$

Определение суммарной эффективности улавливания как в одноступенчатых, так и в многоступенчатых системах пылеулавливания, на основе данных дисперсного анализа с использованием вероятностных методов позволяет в значительной мере получать более точные данные. Данный метод с использованием фракционной эффективности улавливания по данным дисперсного состава позволяет получать более надежные зависимости и данные для разработки адекватной модели описания и последующего расчета эффективности улавливания пылеуловителями на основе вероятностных методов.

Так для пыли керамзита в интервале δ от 1 мкм до 30 мкм функция распределения *D* удовлетворительно описывается следующей зависимостью:

$$D = 122{,}75\int_{-\infty}^{\lg\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{\ln^2(\delta/10)}{\ln^2\sigma}\right] d\lg\delta\,, \quad (17)$$

где *D* – интегральная функция распределения размера частиц *d* пыли керамзита, %, δ – размер частиц пыли керамзита, мкм, lgσ – стандартное логарифмическое отклонение диаметров частиц пыли δ.

Выводы

Рассмотренные зависимости позволяют определить минимальный размер сепарируемых частиц и расстояние до наружной поверхности цилиндрической, кольцевой камеры аппарата циклонного типа.

Эффективность центробежного пылеотделения в кольцевых циклонных камерах является комплексной функцией параметров кинематики движения газа, геометрических размеров аппарата, характеристики пыли и условий аэродинамического воздействия потока на частицы. Однако условия их получения базируются на принятии достаточного числа формализующих процессов допущений. Поэтому теоретические формулы дают достаточные в первом приближении количественно-качественные характеристики процесса. Конкретные зависимости между аппаратурно-режимными параметрами определенных конструкций пылеотделителей могут быть получены только из сопоставительного анализа данных экспериментальных исследований.

Представленные результаты анализа закономерностей проявления факторов, в значительной степени влияющих на центробежную сепарацию пылевых частиц в кольцевых камерах аппаратов, позволяют выделить следующие основные выводы об условиях их высокой эффективности работы, в том числе в устройствах очистки вентиляционных выбросов в производстве керамзита:

- скорости движения пылегазового потока в объеме кольцевой камеры циклонного сепаратора;
- увеличение времени движения пылегазового потока в кольцевом канале за счет увеличения его высоты;
- сокращение времени и пути радиально направленного дрейфа к поверхности корпуса сепаратора за счет уменьшения ширины кольцевого канала.

Принимая во внимание, что возможности повышения эффекта сепарации за счет увеличения скорости потока в кольцевом канале ограничены определенным ее значением, превышение которого уже не вызывает роста количества сепарируемых частиц, варьирование геометрическими параметрами представляется основным направлением совершенствования центробежной сепарации циклонных пылеуловителей.

Данные закономерности, влияющие на центробежную сепарацию частиц пыли, таким же образом относятся и к аппаратам циклонного типа. При этом особенно следовало бы отметить дополнительно существенное влияние на эффективность сепарации частиц пыли в устройствах очистки вентиляционных выбросов при производстве керамзита, стройиндустрии следующих параметров:

- степень крутки потока, определяемого в том числе геометрическими характеристиками, радиусом $R_{вх}$ (расстоянием от оси циклона до оси входного патрубка) и от соотношений данного радиуса $R_{вх}$ к радиусу циклона $R_ц$–$R_{вх}/R_ц$, радиуса выходного патрубка $R_{вых}$ к радиусу циклона $R_ц$–$R_{вых}$ /$R_ц$;

- увеличение зоны сепарации в цилиндрической (конической) части аппаратов циклонного типа (циклоны, аппараты на встречно закрученных потоках ВЗП);
- сокращение, или полное устранение вторичного восходящего циркуляционного потока из бункерной части в центральную часть аппаратов с перетоком – подъемом уловленной пыли. При этом происходит последующий унос из инерционного циклона или ВЗП, и, следовательно, снижается эффективность улавливания частиц пыли.

Для повышения суммарной эффективности η улавливания частиц пыли посредством увеличения эффективности пылеулавливания во второй ступени очистки и сепарации из пылегазового потока частиц диаметром δ_{2II}, которые потенциально могут быть уловлены во второй ступени очистки, в первом приближении радиус аппарата R_{2II} должен быть меньше радиуса аппарата в первой ступени очистки R_{2I}.

Следует также отметить, что суммарная эффективность улавливания пыли является суммой фракционных эффективностей улавливания пыли полидисперсного состава в различного рода пылеулавливающих устройствах. Определение фракционной эффективности улавливания производится с использованием данных дисперсного состава на основе данных дисперсного анализа. Таким образом, значение суммарной фракционной эффективности улавливания можно считать среднеинтегральным значением вероятности улавливания пыли в устройствах очистки пылегазовых потоков. Доверительный интервал величины эффективности улавливания пыли может определяться целым набором факторов, а также некоторыми случайными причинами (флуктуациями), которые могут являться проявлением, в том числе так называемого «волнового» характера вероятности. Данные показатели устройств могут определяться получаемой на основе данных дисперсного анализа функциональной зависимости D – интегральной функции распределения размер частиц d пыли, образующейся при производстве керамзита, и стандартного логарифмического отклонения диаметров частиц пыли lgσ.

Полученные результаты исследования дисперсного состава пыли керамзита показывают, что на мелкодисперсные фракции пылевых частиц ($\delta \leq 10$ мкм) приходится 60-85 % от массы пыли керамзита. При этом значение δ_{50} (среднемедианный размер частиц) данной пыли составляет от 2 до 5 мкм для различных мест отбора пробы в газоходах.

Список литературы

1. Асламова В.С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета: Автореферат дисс. … д-ра техн. наук. – Томск, 2009. – 40 с.

2. Бердт Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688 с.

3. Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне.// Инженерно-строительный журнал. – 2005. – № 11. – С 5-9.

4. Диденко В.Г. и др. Оценка определяющих факторов сепарационного разделения закрученных загашенных потоков аспирационного воздуха // Вестник ВолгГАСУ Сер.: Технические науки. – 2004. – Вып. 3 (13). – С. 107-109.

5. Диденко В.Г., Кисленко Т.А. и др. Определяющие факторы циклонного обеспыливания вентиляционных выбросов // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2011. – № 25. – С. 241-245.

6. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 187 с.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. – 3-е изд., испр. – М.: Наука; гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736 с. (т. VI).

8. Ляпустин П.К. Интенсификация и моделирование процесса сепарации в прямоточном циклоне: Автореферат дисс… канд. техн. наук. – Ангарск, 2005. – 20 с.

9. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1981. – 176 с.

10. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 206 с.

Рецензенты:

Азаров В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, г. Волгоград.

Першин И.М., д.т.н., профессор, заместитель директора филиала Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске по научной работе, заведующий кафедрой управления в технических и биомедицинских системах, г. Пятигорск.