

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОНИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ НА ВСТРЕЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

Экба С.И.¹, Сидякин П.А.¹, Янукян Э.Г.¹, Янукян Д.Э.¹, Боровков Д.П.²

¹ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорск, Россия (357500, Пятигорск, ул. 40 лет Октября, 56), e-mail: sidyakin_74@mail.ru, ekba.s.ig@gmail.com

²ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», Волгоград, Россия (400074, Волгоград, ул. Академическая, 1), e-mail: frigate@yandex.ru

Целью работы являлась исследование характера движения пылевых частиц в пылеуловителях на встречными закрученными потоками. Исследованы силы, обуславливающие движение пылевой частицы в конической сепарационной камере пылеуловителей на встречных закрученных потоках. Получены данные, характеризующие изменения тангенциальной и осевой (вертикальной) составляющих вектора скорости газового потока в пристенной зоне сепарационной камеры. Полученные результаты позволяет использовать найденные безразмерные регрессионные зависимости при составлении расчетной модели движения пылевой частицы в обратной конической сепарационной камере пылеуловителей на встречных закрученных потоках.

Ключевые слова: твердая пылевая частица, Кориолисова сила, коэффициент аэродинамического сопротивления, критерий Рейнольдса, конусность сепарационной камеры.

RESEARCH PARAMETERS MOTION DUST PARTICLES IN THE CONICAL SEPARATION CHAMBER PRECIPITATORS AT OPPOSING SWIRLING FLOW

Ekba S.I.¹, Sidyakin P.A.¹, Yanukyuan E.G.¹, Yanukyuan D.E.¹, Borovkov D.P.²

¹North-Caucasus Federal University, Pjatigorsk, Russia, (357500, Pjatigorsk, str. 40 let Oktjabrja 56), e-mail: sidyakin_74@mail.ru, ekba.s.ig@gmail.com

²Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE), 1 Akademicheskaya Street, 400074, Volgograd, Russia, e-mail: frigate@yandex.ru

The aim of this work was to study the nature of the movement of dust particles in the dust collector on the counter swirling flow. Investigated the forces causing the motion of dust particles in the conical separation chamber precipitators to counter swirling flows. The data characterizing changes in the tangential and axial (vertical) components of the velocity of the gas flow in the wall zone of the separation chamber. The results obtained can be used depending on the regression results are dimensionless in the preparation of the design model of the motion of dust particles in the reverse conical separating chamber precipitators to counter swirling flows.

Keywords: solid dust particle, Coriolis force, factor aerodynamic drag, Reynolds criterion, conicity of the separation chamber.

Производственная деятельность предприятий строительной индустрии связана с выделением больших объемов пыли как в воздух рабочей зоны, так и в атмосферу. В качестве средств обеспыливания широкое распространение получили вихревые аппараты на встречных закрученных потоках (ВЗП).

Теоретическим и экспериментальным исследованиям данных пылеуловителей посвящен ряд работ представителей научной школы Азарова В.Н. [1-9].

Целью работы являлась исследование сил, обуславливающих движение твердой пылевой частицы в конической сепарационной камере пылеуловителя ВЗП.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Движение пылевой частицы в сепарационной камере пылеуловителя происходит под действием аэродинамических сил, действующих на частицу со стороны газового потока. Попадая в сепарационную камеру через тангенциальный ввод, пылевая частица движется по осесимметричной спиральной траектории, приближаясь к стенке под действием массовых и инерционных сил. Уравнение, описывающее движение твердой частицы, находящейся в газовом потоке, протекающем в сепарационной камере, имеет вид:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F}_m + \bar{F}_g + \bar{F}_N \quad (1)$$

где: \bar{F}_m – результирующая массовых сил; \bar{V} – вектор скорости пылевой частицы; \bar{F}_N – реакция стенки канала; \bar{F}_g – результирующая гидродинамических сил; m – масса пылевой частицы;

Для упрощения описания движения принимается допущение о шарообразной форме твердой пылевой частицы, при котором масса распределяется по объему равномерно. При этом вектор силы тяжести направленный вертикально вниз из геометрического центра частицы может быть определен как:

$$\bar{F}_m = \rho_q \frac{\pi d_q^3}{6} g \quad (2)$$

где: d – диаметр частицы; g – ускорение свободного падения; ρ_q – плотность частицы;

Вектор сил, действующих на частицу со стороны газового потока, может быть представлен в виде результирующей сил:

$$\bar{F}_g = \bar{F}_\mu + \bar{F}_a + \bar{F}_w + \bar{F}_p \quad (3)$$

где: \bar{F}_p – сила обусловленная наличием градиента статических давлений (сила Архимеда); \bar{F}_μ – сила сопротивления движения частицы в газовом потоке (сила обтекания); \bar{F}_w – поперечно направленная сила, возникающая в результате вращения частицы в потоке вязкой жидкости (сила Магнуса); \bar{F}_a – сила обусловленная наличием присоединенной массы газа при ускоренном движении частицы в потоке.

Анализ влияния вышеперечисленных сил на движение твердой частицы в закрученном газовом потоке позволяет упростить модель. В условиях движения частиц в закрученном газовом потоке, протекающем по осесимметричному каналу из числа оказывающих значимое

влияние на движение частицы, можно исключить силу Архимеда, силы обусловленные наличием присоединенных масс, а также силу Магнуса.

Предварительный анализ условий движения, основанный на теоретических выводах и практических наблюдениях, показывает, что частица, попавшая в сепарационную камеру пылеуловителя ВЗП, совершает сложное движение. Вращательное движение закрученного газового потока, протекающего по цилиндрической сепарационной камере вдоль оси, вынуждает частицу совершать вращательное движение в горизонтальной плоскости. Возникающая при этом центробежная сила описывается выражением:

$$F_u = \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r m \quad (4)$$

где: r , φ – соответственно радиальная и угловая координаты в цилиндрической системе координат

Наличие центробежной силы заставляет частицу двигаться в радиальном направлении. Следовательно, движение частицы в плоскости вращения можно охарактеризовать как сложное, характеризующиеся наличием Кариолисовой силы:

$$F_{Кор} = 2 \sin(\beta) \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} m \quad (5)$$

где: β – угол между векторами переносной и относительной скорости

Сила сопротивления обтеканию частицы газовым потоком определяется как:

$$F_\mu = \lambda_\mu \frac{\pi d_\mu^2}{4} \frac{\rho (\bar{u} - \bar{V})^2}{2} \quad (6)$$

где: λ_μ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; d_μ – размер твердой частицы; ρ – плотность газа; u – скорость газового потока; V – скорость воздушного потока.

В виду того, что величины скоростей газового потока и пылевой частицы, являются векторными величинами, для практического использования уравнения необходимы сведения о кинематической картине течения потока. При этом практический интерес представляет только пристенная зона течения, в которой происходит сепарация пылевых частиц в результате соприкосновения со стенками сепарационной камеры.

Для получения данных о параметрах пристеночного течения в пылеуловителях ВЗП с обратной конической сепарационной камерой были проведены экспериментальные исследования, суть которых заключалась в определении изменения направления и абсолютной величины вектора скорости газового потока в пристеночной зоне. В качестве

экспериментальной установки был использован пылеуловитель на встречных закрученных потоках с обратной конической формой сепарационной камеры.

Для характеристики интенсивности закрутки потока в настоящее время используются несколько параметров. Наибольшее распространение из них получили два безразмерных параметра: интегральным Φ^* и локальным $tg \alpha$. Интегральный параметр Φ^* характеризует отношение момента количества движения M к осевому количеству движения K произвольном сечении в масштабе линейного размера канала L :

$$\Phi^* = M / KL, \text{ где: } M = 2\pi \int_0^R \rho u \omega r^2 dr; \quad K = 2\pi \int_0^K \rho \omega^2 r dr \quad (7)$$

Эти параметры однозначно связаны между собой и для обобщения опытных данных можно использовать любой из них. Между локальным и интегральным параметрами закрутки существует однозначная связь, определяемая зависимостью:

$$tg \alpha = 1,18 \Phi^{*0,76} \quad (8)$$

Для основных типов закручивающих устройств выведены выражения, позволяющие исходя из характерных конструктивных размеров определить интегральный параметр закрутки потока получаемый на выходе, для тангенциального закручивателя выражение имеет:

$$\Phi_{вых}^* = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D(D-a)}{ab} \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

где: D – диаметр цилиндрической части закручивателя (сепарационной камеры пылеуловителя); b – высота сечения тангенциального ввода закручивателя отнесенная к диаметру цилиндрической камеры; a – ширина сечения тангенциального ввода закручивателя отнесенная к диаметру цилиндрической камеры; α – угол наклона оси тангенциального патрубка к оси воздуховода.

Схема к определению конструктивных размеров пылеуловителя ВЗП приведена на рис.1. При проведении экспериментальных исследований использовано три закручивателя с параметром интенсивности закрутки $\Phi_0^* = 4, 5$ и 6 . Экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 62000 \dots 38000$. При проведении экспериментов значение доли расхода подаваемого на нижний ввод принято равным $L_n/L_{общ} = 0,28$, являющимся оптимальным для получения максимальной эффективности улавливания.

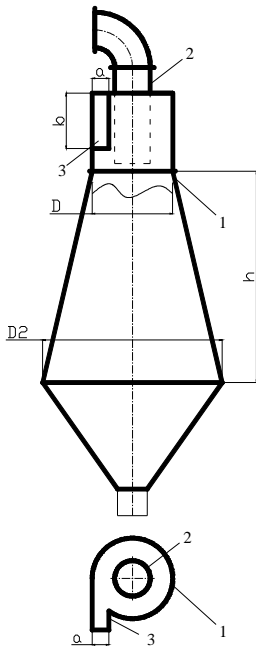


Рис. 1. Схема определения основных конструктивных размеров верхнего ввода пылеуловителя экспериментальной установки. 1 – сепарационная камера; 2 – патрубок очищенного газа; 3 – тангенциальный ввод; a – ширина сечения тангенциального ввода; b – высота сечения тангенциального ввода; D – диаметр камеры первичного тангенциального ввода потока пылеуловителя; D_2 – диаметр основания обратной конической сепарационной камеры; h – высота обратной конической сепарационной камеры.

Полученные значения, характеризующие затухания локальной пристенной интенсивности закрутки потока являются функциями параметра конусности сепарационной камеры и начальной интенсивности закрутки, и не зависят от абсолютных начальных значений скоростей во всем диапазоне изменения чисел Рейнольдса.

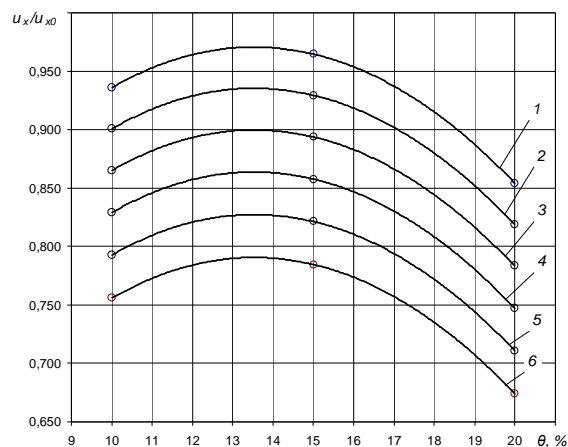


Рис. 2. Зависимость затухания осевой скорости газового потока в пристеночной области от конусности сепарационной камеры. 1 – $h/d = 1$; 2 – $h/d = 2$; 3 – $h/d = 3$; 4 – $h/d = 4$; 5 – $h/d = 5$; 6 – $h/d = 6$

Уравнение регрессии, описывающее затухание тангенциальной скорости газового потока в пристенной области обратно конической сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках имеет вид:

$$u_{\tau}/u_{\tau 0} = 3,835 - 0,00278\theta^2 + 0,0752\theta - 3,338\exp(0,0104h/D) \quad (10)$$

где: u_{τ} – тангенциальная скорость газового потока в пристенной области; $u_{\tau 0}$ –

начальное значение тангенциальной скорости газового потока на входе в сепарационную камеру; h – вертикальная (осевая) координата; D – диаметр цилиндрической части тангенциального закручивателя потока первичного ввода ВЗП; θ – конусность сепарационной камеры, %.

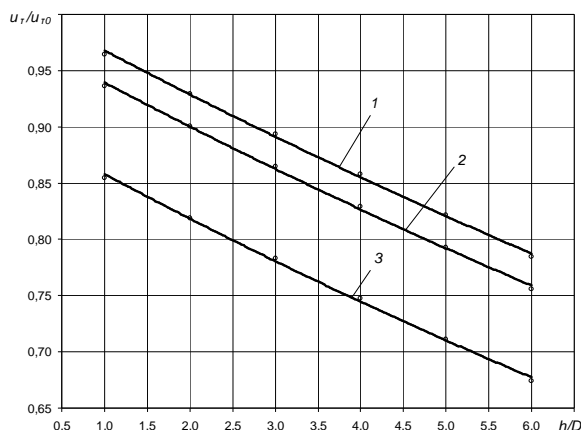


Рис. 3. Зависимость затухания окружной скорости газового потока в пристеночной области от осевой координаты сепарационной камеры. 1 – $\theta = 15\%$; 2 – $\theta = 10\%$; 3 – $\theta = 20\%$.

Уравнение регрессии, описывающее затухание осевой скорости газового потока в пристенной области обратно конической сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках имеет вид:

$$u_x/u_{x0} = 2,967 - 0,00199\theta^2 + 0,0812\theta - 2,996\exp(0,0231h/D) \quad (11)$$

где: u_x – осевая скорость газового потока в пристенной области; u_{x0} – начальное значение осевой скорости газового потока на входе в сепарационную камеру.

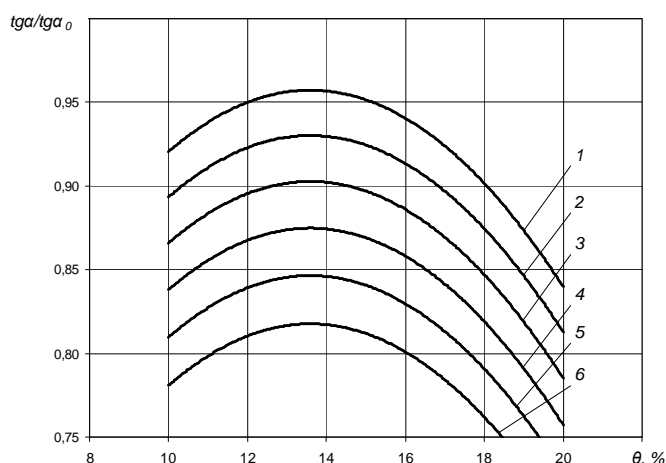


Рис. 4. Зависимость затухания интенсивности закрутки от конусности сепарационной камеры. 1 – $h/d = 1$; 2 – $h/d = 2$; 3 – $h/d = 3$; 4 – $h/d = 4$; 5 – $h/d = 5$; 6 – $h/d = 6$.

Аналогичная регрессионная зависимость, характеризующая затухание локального параметра интенсивности закрутки потока в пристенной зоне обратно конической сепарационной камеры, имеет вид:

$$tg\alpha/tg\alpha_0 = 2,155 - 0,0029\theta^2 + 0,0776\theta - 1,699\exp(0,01557h/D) \quad (12)$$

где: $tg\alpha$ – локальный параметр интенсивности закрутки потока в пристенной области; $tg\alpha_0$ – локальный параметр интенсивности закрутки потока на входе в сепарационную камеру.

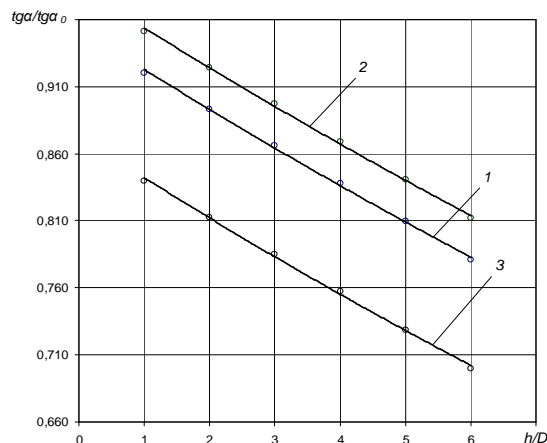


Рис. 5. Зависимость затухания интенсивности закрутки по высоте сепарационной камеры. 1 – $\theta = 10\%$; 2 – $\theta = 15\%$; 3 – $\theta = 20\%$.

Дисперсия аппроксимации значений полученных на основе экспериментальных данных составляет $R^2 = 0,901...0,934$, что свидетельствует об адекватности гипотезы об автомодельности кинематической структуры течения в пристенной зоне по отношению к параметру конусности сепарационной камеры и начальному значению интенсивности закрутки потока во всем диапазоне рассмотренных значений критерия Рейнольдса. Данный вывод позволяет использовать полученные безразмерные регрессионные зависимости при составлении расчетной модели движения пылевой частицы в обратной конической сепарационной камере пылеуловителей на встречных закрученных потоках.

Выводы

1. С целью определения параметров пристенного течения в пылеуловителях ВЗП с обратной конической формой сепарационной камеры проведены экспериментальные исследования, в ходе которых измерены абсолютные величины и направления вектора скорости газового потока в пристенной зоне.
2. В результате аппроксимации полученных данных полиномиально - экспоненциальными зависимостями получены безразмерные уравнения регрессии, характеризующие изменения

тангенциальной и осевой (вертикальной) составляющих вектора скорости газового потока в пристенной зоне сепарационной камеры.

3. Во всем диапазоне изменения экспериментальных факторов наблюдается автомодельность кинематической структуры течения относительно значений параметра конусности сепарационной камеры и параметра начальной интенсивности закрутки потока на входе в сепарационную камеру.

Список литературы

1. Азаров В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения. Монография. – Волгоград: РПК Политехник, 2004. – 136 с.
2. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками / Боровков Д.П., Сидякин П.А., Бурба И.В., Экба С.И. // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 11-5. С. 866-870.
3. Обеспечение безопасности воздушной среды помещений по производству деревянных строительных конструкций / В.Н. Азаров, П.А. Сидякин, С.И. Экба, Е.А. Семенова, Д.П. Боровков // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая*. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/AzarovSidyakinEkbaSemenovaBorovkov-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/AzarovSidyakinEkbaSemenovaBorovkov-2013_2(27).pdf).
4. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии / Азаров В.Н., Боровков Д.П. // *Строительные материалы*. 2012. № 5. С. 65-67.
5. Применение раскручивателей для утилизации энергии закрученного потока в пылеуловителях на встречных закрученных потоках // Боровков Д.П., Сидякин П.А., Экба С.И., Семенова Е.А., Шульга С.В. // *Международное научное издание Современные фундаментальные и прикладные исследования*. 2013. № Специальный выпуск. С. 105-111.
6. Сидякин П.А., Щитов Д.В., Магомадов И.З. Разработка и оптимизация мобильной системы пылеулавливания, предназначенной для обеспыливания выбросов при проведении восстановительных работ в строительстве // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 5; URL: www.science-education.ru/119-14537.
7. Совершенствование систем обеспыливания на предприятиях деревообрабатывающей отрасли / Сидякин П.А., Экба С.И., Семенова Е.А., Боровков Д.П., Маринин Н.А. // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2013. № 11 (133). С. 67-70.
8. Экспериментальные исследования режимов работы пылеуловителя на встречных закрученных потоках в зависимости от длины патрубка вторичного потока / Азаров В.Н.,

Луканин Д.В., Гладков Е.В., Сидякин П.А., Шульга С.В. // Современная наука и инновации. 2013. № 2. С. 19-29.

9. Экспериментальные исследования эффективности очистки древесной пыли на предприятиях строительной индустрии пылеуловителями на встречных закрученных потоках / Экба С.И., Сидякин П.А., Боровков Д.П., Азаров Д.В. // Современная наука и инновации. 2013. № 2. С. 12-18.

Рецензенты:

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

Пшеничкина В.А., д.т.н., профессор, директор Института строительства и жилищно-коммунального хозяйства ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», г.Волгоград.