

Р. Р. Усманова, Г. Е. Заиков, Р. Я. Дебердеев

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Ключевые слова: промышленные выбросы, динамический газопромыватель, математическая модель, эксперимент, эффективность очистки газа, диаметр частиц.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования, направленные на увеличение эффективности и качественного улучшения характеристик оборудования для очистки промышленных выбросов. Для оценки фракционной эффективности газоочистки разработана математическая модель движения дисперсной фазы. Выполнен эксперимент по определению эффективности газоочистки. Проведенный анализ показывает качественное совпадение полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Keywords: industrial emissions, dynamic separator, mathematical model, the experiment, the efficiency of the gas cleaning, particle diameter.

Experimental and theoretical studies aimed at increasing efficiency and improving the quality of the equipment for the purification of industrial emissions. To assess the effectiveness of fractional gas purification treatment developed a mathematical model of the motion of the dispersed phase. Performed an experiment to determine the effectiveness of gas purification. The analysis shows a qualitative agreement of the theoretical and experimental results.

1. Актуальность процесса очистки газовых выбросов

В химической промышленности и в смежных с ней отраслях производства используются аппараты с закрученными потоками среды, эффективность которых полностью определяется гидродинамическим совершенствованием ведения процесса. В качестве примера можно указать на такие распространенные устройства как сепараторы, циклоны, вихревые аппараты, вращающиеся распылители, центробежные нагнетатели различного назначения и т.д. Увеличение скорости тепло-массообмена часто достигается закручиванием потоков перерабатываемых материалов, как например, в камерах вихревых сушилок, скрубберах некоторых типов. В настоящее время остро стоит проблема повышения эффективности пылеулавливающих установок в связи с резким повышением требований к экологическому совершенствованию производства. Последнее часто достигается рациональной организацией закрутки потока очищаемого газа.

Несмотря на обширный теоретический и экспериментальный материал по анализу вращательного течения газа, проведенного применительно к аппаратам с закрученными потоками, ряд наблюдаемых в них явлений не может быть объяснен в рамках сложившихся представлений, а проблема повышения их эффективности остается острой. Все это вызывает необходимость дальнейшего изучения гидродинамических процессов в устройствах центробежного типа.

2. Постановка задачи исследования

Для расчета эффективности сепаратора используются методики, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях. Наиболее полные и достоверные результаты дают экспериментальные исследования сепараторов, которые проводятся главным образом в физических моделях. Эти дорогостоящие опыты могут дать исчерпывающую информацию о процессах, происходящих в сепараторе, но они относятся лишь к конкретной исследуемой кон-

струкции сепаратора, а другие конструкции следует исследовать вновь в полном объеме.

Значительно более общие результаты и рекомендации можно получить, используя математические модели гидромеханических процессов в сепараторе. Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволит оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в сепараторах, а также создать методику оценки эффективности пылеуловителя.

На сегодняшний день проводится теоретический расчет только суммарной (интегральной) эффективности сепаратора, без расчета эффективности очистки по каждой фракции, а так же расчет минимального диаметра частиц, осажденных в корпусе сепаратора полностью. Таким образом, выявляются задачи настоящей работы:

Создание и исследование математических моделей центробежного движения частиц.

Разработка методики оценки эффективности сепаратора.

Проверка достоверности данной методики расчета эффективности.

3. Математическое моделирование процесса сепарации

В виду сложности комплексных систем газоочистки, большого числа переменных и вероятностного характера исходной информации, разработка этих систем возможна лишь на основе достаточно полных математических моделей, реализуемых с помощью специальных программных комплексов в виде вычислительных экспериментов. В качестве программного комплекса для моделирования динамического газопромывателя был выбран программный комплекс ANSYS-14/CFX, как наиболее современное средство моделирования, основанное на численном решении уравнений гидрогазодинамики [1,2]. Гидродинамический расчет дает возможность предсказать эффективность процесса сепарации на стадии проектирования.

Расчетная сетка была построена в сеточном генераторе ANSYS ICEM CFD. Сетка содержит 2284756 гексаэдрических элементов.

Динамический газопромыватель диаметром 0,25 м, диаметром сепаратора 0,23 м; воздушный поток движется со скоростью W_0 от 1 м/с до 20 м/с и закручивается на 35°; пыль имеет диаметр частиц от 1 мкм до 50 мкм, плотность пыли равна 2300 кг/м³; запыленность потока 0,025 кг/м³.

В системе автоматизированного проектирования Solid Works была создана геометрическая модель динамического газопромывателя. Затем проводилось ее импортное в программный комплекс ANSYS-14/CFX. Далее задавалась математическая модель движения газа, воды и дисперсных частиц.

Численный анализ течения газа внутри динамического газопромывателя [3] сводится к решению системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Для замыкания газодинамических уравнений Навье-Стокса использовалась стандартная (к-ε)-модель турбулентности. Для нахождения скалярных параметров **k** и **ε** используются два дополнительных модельных уравнения, содержащих эмпирические константы [4,5]. Путем расчетов было получено 150000 данных. Результаты численного эксперимента подвергались статистической обработке. Разработанная модель позволяет рассчитывать технологические характеристики динамического газопромывателя, например, эффективность очистки, фракционную очистку и т.д.

Рассмотрим общепринятую схему движения газового потока в газопромывателе. Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса газопромывателя, подвергаясь эффекту центробежного сепарирования по окружности.

В связи с тем, что плотность частицы ρ много больше плотности воздуха, частица, попадая в газопромыватель с некой скоростью входящего потока, по инерции стремясь двигаться равномерно и прямолинейно (рис.1, траектория 1), отклоняется при этом от оси газопромывателя в сторону его внешней стенки (рис.1, траектория 2).

Согласно принятым допущениям, тангенциальная составляющая скорости частицы равна скорости потока. Радиальному смещению частицы со скоростью препятствует сила сопротивления среды. Сила сопротивления движению частицы вычисляется по формуле Стокса

$$F_{cm} = 3\pi\mu_c d_v \left[\vec{v}_z - \vec{v}_v \right], \quad (1)$$

где v_z, v_v - скорость газа и частиц, м/с; μ_g - динамическая вязкость газа, Па·с.

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

Криволинейной траектории движения частицы соответствует сила центростремительного ускорения.

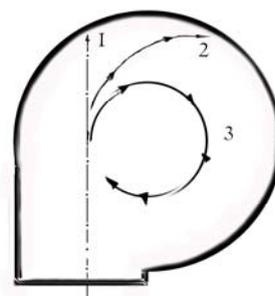


Рис. 1 - Траектория движения частицы

Предлагается методика расчёта, единая с методикой расчета циклонов [6], по которой общая и фракционная эффективность пылеулавливания может быть определена аналитически:

$$\eta = 50 \cdot [1 + \Phi(x')] \quad (2)$$

где

$$x' = \frac{\lg \left[\frac{d'_{50}}{d_{50} \cdot k \cdot 10^3 \cdot \sqrt{D \cdot \frac{\mu_g}{\rho_c} \cdot g_r}} \right]}{\sqrt{\sigma^2 + \lg^2 \left(\frac{d_{50}}{d_{16}} \right)}}$$

$$\eta_\phi = \frac{1}{2} \cdot [1 + \phi(x)]$$

где

$$x = \frac{\lg \left[\frac{d_v}{d_v \cdot k \cdot 10^3 \cdot \sqrt{D \cdot \frac{\mu_g}{\rho_c} \cdot g_r}} \right]}{\sigma}$$

где d'_{50} - медиана распределения частиц пыли на входе в аппарат, м; d_{50} - диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%, м; g_r - условная скорость газа в аппарате, м/с; μ_g - динамическая вязкость газа, Па·с; ρ_c - плотность частиц, кг/м³; d_{16} - диаметр частиц на входе в аппарат, при котором масса всех частиц, имеющих размер меньше, чем d_{16} , составляет 16% от общей массы пыли, м; σ - величина, характеризующая дисперсию частиц; K - коэффициент, для данного аппарата получено $K = 28.54$.

Рассмотрения полученной формулы позволяет выявить факторы, от которых зависит эффективность улавливания пыли в сепараторах.

Данная формула позволяет определить эффективность пылеулавливания по фракциям. На рис.2 показана фракционная эффективность газопромывателя с тангенциальным подводом воздуха при изменении скорости газового потока на входе в аппарат, что влияет на изменение величины числа Рейнольдса и увеличение турбулентности потока.

Увеличение скорости газового потока при входе в газопромыватель повышает эффективность улавливания пыли, однако до некоторого значения скорости, характерного для данного вида пыли. Даль-

нейшее увеличение скорости не только не приводит к повышению эффективности улавливания, но значительно ее снижает. Объясняется это тем, что с возрастанием скорости в газопромывателе увеличивается турбулентность, которая препятствует сепарации пыли и даже способствует переходу уже отложившейся в бункере пыли вновь во взвешенное состояние и выносу ее из газопромывателя.

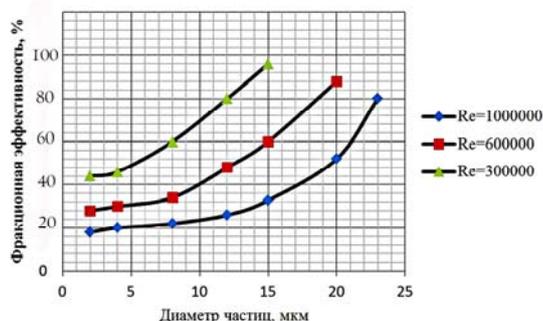


Рис. 2 - Фракционная эффективность очистки газа в зависимости от величины числа Рейнольдса Re для газового потока

Увеличение массы пылевых частиц облегчает их улавливание и, следовательно, повышает эффективность очистки. Таким образом, коагуляция пыли в рабочей зоне аппарата весьма желательна.

Вязкость газа увеличивается при повышении температуры. При этом несколько снижается эффективность улавливания пыли.

4. Экспериментальное исследование газопромывателя

В качестве экспериментального образца для подтверждения достоверности расчетов с использованием разработанной методики оценки эффективности газопромывателя был использован динамический газопромыватель с тангенциальным подводом воздуха и углом поворота лопаток завихрителя - 35°. Испытания газопромывателя проводились на установке, состоящей из следующего оборудования: 1 – электродвигатель; 2 – вентилятор; 3 – рабочее колесо; 4 – направляющий аппарат; 5 – пылеуловитель; 6 – воздухопровод; 7 – динамический газопромыватель; 8 – циклон; 9 – бункер для пыли; 10 – отстойник, тканевый мешок для сбора пыли на выходе из аппарата. Схема стенда для испытания газопромывателя показана на рис.3.

Для определения фракционной степени очистки газа на основании опытных испытаний, полученные в результате пробного запуска аппарата пробы пыли были взяты для проведения лабораторного анализа. Запыленность газовой смеси определялась прямым методом. На прямых участках трубопровода до и после аппарата производился отбор проб газовой смеси. После установления соответствующего режима работы аппарата пробы газа отбирались с помощью заборных трубок, вводимых строго перпендикулярно направлению движения потока в места, где предварительно замерялась скорость газового потока с помощью аэродинамического зон-

да. Для соблюдения изокINETИЧНОСТИ отбора проб на заборных трубках применялись сменные наконечники различных диаметров. Полное улавливание пыли, содержащейся в отобранной пробе газовой смеси, производилось путем внешней фильтрации просасыванием смеси с помощью оттарированного электроасpirатора ЭА-30 через специальные аналитические фильтры АФА, которые вставлялись в фильтрующие патроны. Время отбора фиксировалось по секундомеру, а скорость - ротаметром электроасpirатора ЭА-30. Отбор проб до аппарата и после него проводился одновременно. Перед началом замеров аналитические фильтры помещались в эксикатор в открытых бюксах и выдерживались 12 часов, после чего взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. После отбора проб аналитические фильтры также выдерживались в эксикаторе 12 часов и взвешивались. Затем подсчитывался привес пыли на фильтрах с учетом изменения веса контрольных фильтров.

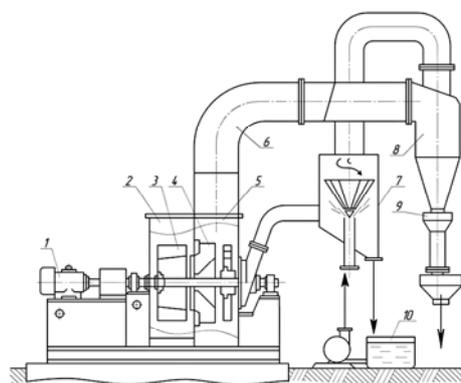


Рис. 3 - Установка для очистки воздуха от пыли: 1 – электродвигатель; 2 – вентилятор; 3 – рабочее колесо; 4 – направляющий аппарат; 5 – пылеуловитель; 6 – воздухопровод; 7 – динамический газопромыватель; 8 – циклон; 9 – бункер для пыли; 10 – отстойник

Для каждого режима работы аппарата проводилось 8 замеров с различным временем отбора проб.

Эффективность очистки воздуха от пыли можно определить, зная величину концентрации пыли в воздухе до очистки Z_1 и после очистки Z_2 (мг/м³). Она выражается в процентах:

$$\eta \approx \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \cdot 100, \% \quad (3)$$

Обработка полученных результатов проводилась по известной методике [7]. Для исследования использовалась пыль белой сажи. Ввиду отсутствия данных по дисперсности пыли были проведены исследования по определению ее дисперсного состава.

Дисперсность пыли определялась методом седиментации, в основу которого положен процесс осаждения твердых частиц в жидкой среде. В результате эксперимента установлено, что исследуемая пыль не содержит частиц диаметром более 50 мкм. Результаты исследований представлены на рисунке 5

и позволяют сделать вывод, что исследуемая пыль содержит 70% частиц диаметром менее 15 мкм, из них около половины диаметром до 10 мкм.

5. Сопоставление результатов теоретического расчета и результатов, полученных экспериментальным путем

Результатом данной работы практической и теоретической работы стало определение фракционного состава улавливаемых частиц, что позволило определить фракционную эффективность данного испытываемого газопромывателя, а также сравнить его газоочистную способность для частиц разного диаметра.

Эффективность, вычисленная по результатам эксперимента, сравнивалась с результатами, полученными при теоретическом расчете эффективности аппарата с теми же параметрами с использованием предложенной методики расчета.

Таким образом: общая эффективность, вычисленная по формуле (3) составляет 92,56%. Фракционная эффективность, вычисленная по формуле (2), для частиц размера 10 мкм -88,94%.

Значение разницы между величиной эффективности пылеулавливания, вычисленной по формуле (2) и полученной экспериментально, приведено на рис.4.

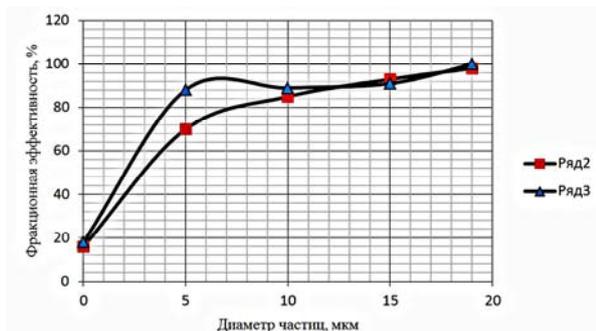


Рис. 4 - Сопоставление величины эффективности пылеулавливания вычисленной теоретически (ряд 2) с величиной эффективности, полученной экспериментально (ряд 3)

Максимальное значение отклонения не превышает 15%, что подтверждает возможность использования разработанной методики расчета для центробежных сепараторов. Величина общей эффективности и эффективности улавливания частиц размером более 10 мкм, полученная при теоретическом расчете и подтвержденная экспериментом, превышает 80%, т.е. данная технологическая разработка обеспечивает требова-

ния ПДВ предприятий [8]. Это подтверждает целесообразность ее внедрения в серийное производство.

Выводы

Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Выполненный обзор литературы показал актуальность исследований в области очистки воздуха, а также необходимость создания методики расчета эффективности газоочистки.
2. Для обоснования технических разработок по совершенствованию сепараторов предложена модель движения частицы пыли в закрученном турбулентном течении, дающая возможность расчета траектории частицы.
3. Предложена методика оценки фракционной эффективности пылеулавливания для различных моделей пылеулавливающих аппаратов центробежного типа.
4. Выполнено экспериментальное определение эффективности пылеулавливания динамического газопромывателя. Проведенный анализ показывает, что допущения, принятые при рассмотрении движения частиц во вращающемся потоке обеспечивает качественное совпадение полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Литература

1. А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева ANSYS в руках инженера: практическое руководство. ВНИИМП, Москва, 2003. 272 с.
2. К.А. Басов ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. ДМК пресс, Москва, 2005. 640 с.
3. Пат. РФ 2339435 (2008).
4. В.К. Булгаков, И.И. Потапов Конечно-элементные схемы высокого порядка для задачи Навье-Стокса. Модифицированный SUPG-метод. Изд-во Санкт-Петербургского гос. техн. ун-та, Санкт-Петербург, 2003. С. 129-132.
5. А.Л. Гончаров, И.В. Фрязинов О построении монотонных разностных схем для уравнений Навье-Стокса на девятиточечных шаблонах. Ин-т Прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва, 1986. № 93, С.14-16.
6. И.Е. Идельчик Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения. Механическая очистка промышленных газов. НИИОГАЗ, Москва, 1974. С. 135-159.
7. В.Страус Промышленная очистка газов. Химия, Москва, 1981. 616 с.
8. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы. Информационно-издательский центр Минздрава России, Москва, 1997. 20с.