

РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОПЫЛЕВОГО ПОТОКА В ЦЕНТРОБЕЖНО-ИНЕРЦИОННОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ С ПОЗИЦИЙ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Я.В. Чистяков, аспирант, А.А. Махнин, доцент, *А.В. Невский, профессор

Ярославский государственный технический университет

*Ивановский государственный химико-технологический университет

e-mail: nevsky@isuct.ru

Предложены методические принципы описания процесса сепарации (выделения) твердых частиц из воздушного потока, поступающих в зону разделения - пространство, в котором происходит отделение твердых частиц от воздушного потока с целью разработки конструкции высокоэффективного с позиций эколого-экономического подхода центробежно-инерционного пылеуловителя-классификатора.

A methodology of designing an ecological-economic high-performance centrifugal inertial dust catcher-classifier is proposed allowing a description of the separation of solid particles from an air flow. The particles enter the separation zone – a space where their separation from the air flow occurs.

Ключевые слова: эколого-экономический подход, сепарация, твердые частицы, пылеуловитель.

Key words: ecological-economic approach, separation, solid particles, dust catcher.

В современных условиях важнейшими рычагами повышения эффективности предприятий различного профиля должны стать: внедрение в производство энергоресурсосберегающих химико-технологических систем, организация замкнутых оборотных циклов, комплексная переработка и утилизация вещества и энергии технологических потоков. Это позволит решить вопросы рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды в целом. В этой связи представляют интерес разработка и развитие методических принципов проектирования энергоресурсосберегающих производств на основе изучения физико-химической сути технологических процессов, их эколого-технологического анализа и синтеза, разработка конструкций инновационного высокоэффективного оборудования [1–4].

Составной частью решения данной проблемы является создание методик проектирования систем сепарации и очистки загрязненного воздуха нового поколения с высокими техническими характеристиками. При этом перед разработчиками возникают серьезные проблемы, основными из которых являются обеспечение высокой эффективности функционирования оборудования сепарации и очистки при уменьшении его себестоимости, снижения негативных воздействий на окружающую среду и другие. Выбор проектных параметров установок данного класса, используя традиционные математические модели и методы проектирования, не представляется возможным. Например, определение характеристик, обеспечивающих заданную степень сепарации и классификации фракций при высокой производительности, связано с необходимостью решения задач газодинамики в условиях высоких скоростей закрученных потоков, многокомпонентности и многофазности, наличия турбу-

лентности и рециркуляционных течений в полостях сложной формы. Серьезной проблемой также являются объективные временные и материальные ограничения при создании и отработке новых конструкций. Все это вызывает необходимость проведения проектирования новых конструктивных узлов перспективных установок с высокими техническими характеристиками на базе новых методических принципов разработки, в основу которой должна быть положена многофункциональная интегрированная система высокоинформационных математических моделей, реализуемая в отечественных программных комплексах, открытых для развития [5, 6]. Широко известны и хорошо себя зарекомендовали универсальные наукоёмкие программные САЕ-систем для решения общетехнических задач (например, ANSYS/CFX, CosmosFloWorks, FlowVision и другие), однако разработка специальных функций, необходимых для учета особенностей процессов в рассматриваемых объектах, требует открытого доступа к программному коду таких коммерческих программных систем, что затрудняет их использование. Следует также отметить высокую стоимость их эксплуатации. Это подтверждает необходимость разработки прикладных систем адекватных физических и математических моделей процессов гетерогенной газодинамики, происходящих в центробежных сепараторах (пылеуловителях), и построения специализированного программно-вычислительного комплекса для их реализации, позволяющего учесть функциональные особенности данного класса объектов и предназначенного к использованию в проектной практике на отраслевых предприятиях. Для обеспечения достоверности прогнозирования, сравнимой с той, что дает физический эксперимент, использованы высокоинформа-

тивные модели, учитывающие с приемлемой точностью не только основные закономерности процессов, но и специфические для сепараторов (пылеуловителей) условия работы, осложняющие эти процессы. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена двумя причинами: во-первых, крайней необходимостью проектирования подобных аппаратов для развития отрасли в части создания более совершенных и конкурентно-способных образцов техники, и во-вторых, насущностью проблемы в свете развития научного потенциала отрасли.

Основная часть воздушного сепаратора (пылеуловителя) – зона сепарации (зона разделения), т.е. пространство, в котором происходит отделение твердых частиц от воздушного потока, а также разделение различных фракций, обеспечиваемое различием их инерционных свойств. Назначение центробежно-инерционного сепаратора (рис. 1) – отделение пыли от воздуха. Это происходит в результате действия двух факторов – ее оседания на стенки корпуса под действием центробежной силы во вращающемся потоке, и за счет отставания более инерционных частиц конденсированной фазы (К-фазы) от газа при развороте потока. При дальнейшем после разворота потока движении отделенных частиц пыли их скорость резко падает за счет увеличения сечения воздуховода, вследствие чего они выпадают под действием сил тяжести в приемное устройство.

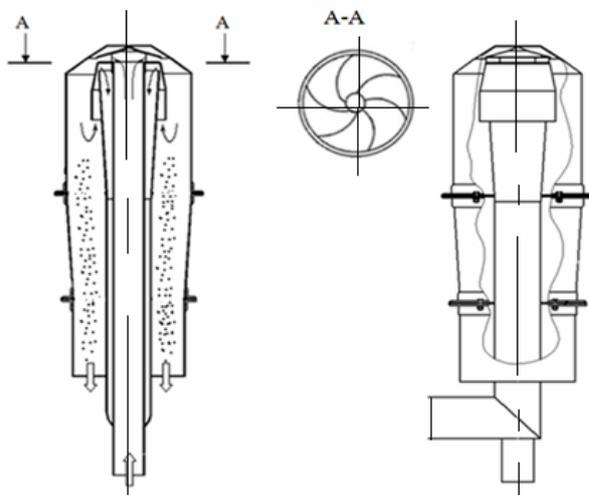


Рис. 1. Схема центробежно-инерционного сепаратора, (стрелками указано направление движения газового потока и частиц).

В центробежно-инерционном сепараторе-классификаторе (рис. 2) имеют место два явления. Во-первых, происходит отделение пыли от воздуха, как и в первом случае, а во-вторых, осуществляется отделение крупной фракции от мелкой. Разделение частиц разного размера происходит в зоне Б. Здесь поток разгоняется на специальных выступах обтекаемой формы, отклоняясь от поверхности стенки (рис. 3).

Двигаясь после среза выступа мелкая фракция, увлекаемая потоком, пролетает зону щелей, не успевая осесть в пылесборник крупной фракции, а крупные, более тяжелые частицы, вследствие более быстрого оседания под действием центробежной силы во вращающемся потоке, попадают в щелевое отверстие пылесборника.

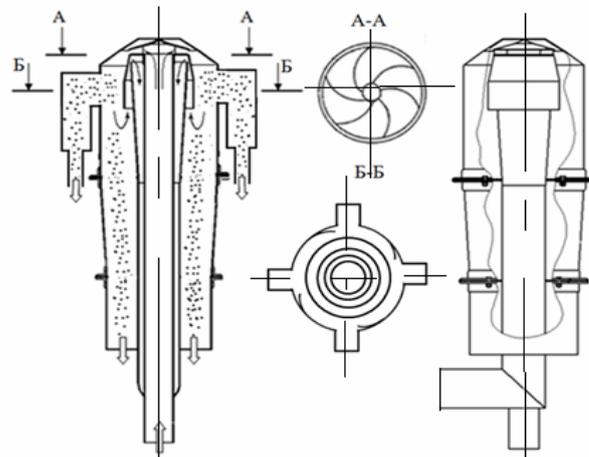


Рис. 2. Схема центробежно-инерционного сепаратора с классификацией (стрелками указано направление движения газового потока и частиц).

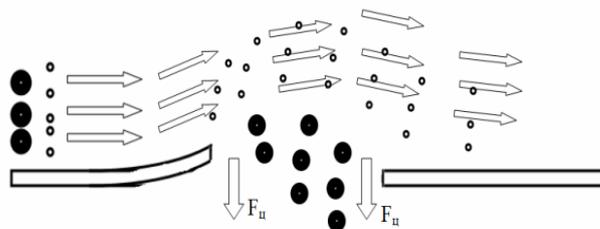


Рис. 3. Схема движения потока в зоне разделения частиц.

Для определения таких параметров конструкции сепаратора, как геометрия направляющих каналов, скорости вращения, а так же размеров отклоняющего выступа и щелевого пылесборника, необходимо проведение численного эксперимента по исследованию протекающих процессов.

Для теоретического моделирования процесса сепарации сформулируем его математическую модель, ориентированную на численные методы решения. Для теоретического решения такой сложной задачи, как исследование течения многофазных потоков в конструкциях пылеуловителей, возникает необходимость решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений. Причем область изменения исходных функций настолько широка, что обычные методы аналитического исследования здесь в общем случае не могут быть использованы для получения полного решения задачи. В связи с этим численный эксперимент приобретает в данной области механики важное значение в комплексе с традиционным физическим

экспериментом. При этом важный принцип использования получаемых математических результатов в данном направлении состоит также в анализе физики явления и проясняет качественную картину, с помощью которой проверяется и уточняется постановка задачи.

Двухфазное рабочее тело отличается от однофазного («чистого газа») наличием в газовом потоке достаточно мелких твердых или жидких частиц различных форм и размеров, обменивающихся с газом кинетической энергией. Механизм движения двухфазных сред состоит в увлечении конденсированных частиц аэродинамическими силами со стороны газового потока. При движении двухфазного потока наблюдается неравномерность состава, связанная как с его исходным составом, так и с перераспределением частиц в связи с различием скоростей. В общем случае при течении двухфазного рабочего вещества наблюдается разность скоростей газа и частиц.

Поведение частицы, находящейся в движущейся среде внутри зоны сепарации, определяется следующими силами [7]:

- аэродинамические силы, воздействующие на поверхность частицы К-фазы со стороны газового потока (сила аэродинамического сопротивления, сила вязкого трения, сила Архимеда, сила присоединенной массы), проявляющихся лишь при наличии разности скоростей между газом и частицами;

- массовые силы, действующие на частицу: (сила тяжести и центробежная сила, обусловленная вращением потока);

- силы, действующие между отдельными твердыми частицами (силы от взаимных столкновений; силы трения; силы сцепления).

При выводе уравнений, описывающих движение двухфазного рабочего вещества в рассматриваемых объектах, примем следующие допущения.

Объемная доля К-фазы в рассматриваемых процессах невелика, в связи с чем соударениями частиц пренебрегаем [8, 9].

Гидродинамические силы, действующие на движущуюся частицу, учитываются посредством коэффициента аэродинамического сопротивления C_D , который учитывает ее размеры и форму. В том случае, когда частицы имеют различные размеры и формы, их необходимо разбить на фракции, в каждую из которых входят частицы с одинаковыми параметрами. Подобное предположение можно считать достаточно обоснованным [9].

При выводе системы основных уравнений, описывающих движение двухфазного рабочего вещества (уравнение неразрывности, уравнение количества движения, уравнение энергии и уравнение состояния) поток частиц будем рассматривать в виде гипотетической сплошной

среды, взаимодействующей с газовой средой по законам взаимодействия частиц с газовым потоком. Анализ перечисленных сил с точки зрения их роли в процессе воздушной сепарации показывает, что доминирующими являются силы аэродинамического сопротивления и центробежные силы [10]. Влияние инерции присоединенной массы и Архимедовых сил мало, если речь идет о сепарации твердых частиц в дозвуковом газовом потоке. При невысоких концентрациях К-фазы интенсивность силового взаимодействия частицы с окружающим газом практически не зависит от присутствия соседних частиц в ближайшей окрестности. Пренебрежимо мало и непосредственное взаимодействие частиц друг с другом.

С учетом указанных особенностей сформулируем принципы создания математической модели процесса сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе. В основу математической модели газодинамических процессов положим уравнения движения многофазного химически не реагирующего газа, при этом воспользуемся гипотезой сплошности всех совместно движущихся компонентов. В общем случае для такой физической среды в систему уравнений движения входят следующие величины: вектор скорости потока в данной точке; местные термодинамическое давление и температура; удельная внутренняя энергия смеси; плотность среды и некоторые другие величины, связанные с вышеперечисленными параметрами. Наиболее эффективной для инженерных расчетов и корректной математической моделью сплошной среды, на основании которой составлена система уравнений движения многофазной смеси, является модель, рассматривающая течение сплошной среды как «движение взаимопроникающих континуумов» [11]. Для замыкания системы используются законы взаимодействия фаз. Пространственные физические границы расчетной области течения газового потока подразделяются на следующие типы: непроницаемая стенка, открытые границы и ось симметрии. Для непроницаемых границ задаются условия прилипания, т.е. равенство нулю нормальной и касательной составляющих вектора скорости потока. Через открытые границы происходит конвективный перенос массы газа, К-фазы и соответствующие этим массам переносы импульса и энергии, поэтому на таких границах постановка граничных условий заключается в определении соответствующих параметров потока. На оси симметрии обеспечивается равенство нулю нормальных к оси составляющей скорости и градиентов термодинамических параметров.

Для расчета рассматриваемых течений применен численный метод, использующий схемы

расщепления метода крупных частиц [12], но реализованный на неравномерной сетке метода конечных элементов.

С помощью разработанной программы проведен численный эксперимент по исследованию

процесса сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе. На рис. 4 представлены результаты численного моделирования установившегося газодинамического процесса в модельной установке.

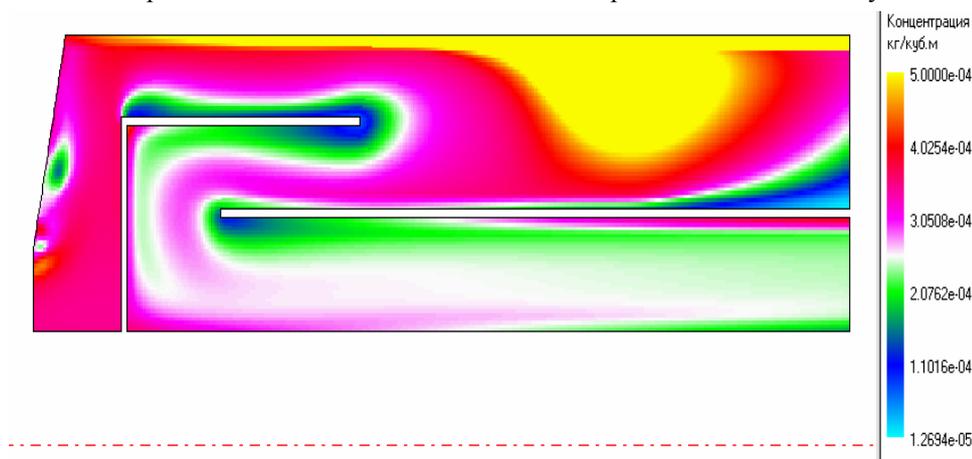


Рис. 4. Поле концентрации К-фазы в зоне сепарации для пыли плотностью 200 кг/м³ с размером частиц 10 мкм.

На рис. 5 представлено сравнение теоретически рассчитанной степени очистки запыленного потока с экспериментальными данными для различных размеров частиц пыли плотностью 200 кг/м³.

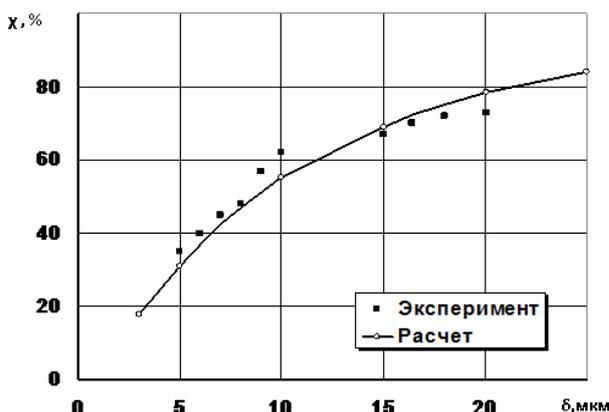


Рис. 5. Зависимость степени очистки χ газового потока от размера частиц δ для пыли плотностью 200 кг/м³.

Проведенный статистический анализ представленных результатов свидетельствует о хорошем соответствии результатов численного эксперимента по предлагаемой нами методике с данными натурального эксперимента. При этом следует отметить, что имеет место удовлетворительное согласование данных для различных параметров К-фазы и расходов потока через установку, что позволяет рекомендовать предлагаемые методические принципы для расчета и оптимизации высокоэффективных с точки зрения эколого-экономического подхода конструкций пылеуловителей.

Известно [1], что показатели эколого-экономической эффективности при проектировании технологического оборудования (особенно нового) используются для: 1) сравнительной оцен-

ки проектных вариантов; 2) предварительной оптимизации технологического оборудования; 3) оценки общей рентабельности функционирования технологического оборудования.

Так, по общепринятой методике в качестве обобщающего показателя экономической эффективности функционирования технологического оборудования используется приведенный доход [1]:

$$D_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \Pi_i V_i - C - E_H K, \quad (1)$$

где: Π_i – отпускная цена на продукты ХТС, руб/ед; V_i – годовой объем выпуска и реализации продуктов ХТС; C – суммарные годовые эксплуатационные затраты, руб/год; E_H – нормативный коэффициент экономической эффективности капиталовложений, год⁻¹; K – капитальные затраты на реализацию проекта (ввод в эксплуатацию технологического оборудования), руб.

Максимальный приведенный доход соответствует минимальным приведенным затратам, ПЗ:

$$\text{ПЗ} = C + E_H K \quad (2)$$

Для функционирования технологического оборудования необходимы затраты двух видов – постоянные и переменные. К постоянным затратам относят амортизационные отчисления, расходы на техническое обслуживание, налоги, оплату труда, страхование и т.д. Переменные затраты – это расходы на сырье и материалы, энергию, транспортировку, упаковку продукции, контроль качества продукции (в нашем случае, в том числе – очищаемый воздух, являющийся продуктом наряду с улавливаемой

К-фазой) и т. д.

Для большинства производственных систем, в том числе и для рассматриваемой в данной работе, максимальную долю затрат составляют затраты на сырье и энергию. В результате использования предлагаемой нами методики расчета и оптимизации работы высокоэффективных центробежных пылеуловителей существенно снижаются обе эти главные статьи расходов.

В нашем конкретном случае, в результате функционирования центробежного пылеуловителя будет иметь место: сокращение объемов забора свежего воздуха, уменьшение выброса загрязняющих веществ в атмосферу, выручка от реализации продуктов пылеулавливания. В этой связи предлагаем оценивать эколого-экономическую эффективность, \mathcal{E} , предлагаемых проектных решений по уравнению:

$$\mathcal{E} = D - ПЗ, \quad (3)$$

где: D – доход; $ПЗ$ – приведенные затраты.

В свою очередь, доход в нашем случае целесообразно рассчитывать по уравнению:

$$D = \Delta П_{\text{свеж.в.}} + \Delta П_{\text{выбр.в.}} + \Delta П_{\text{загр.в-тв}} + V_{\text{реал.пр.}}, \quad (4)$$

где: $\Delta П_{\text{свеж.в.}}$ – экономия на плате за забор свежего воздуха; $\Delta П_{\text{выбр.в.}}$ – экономия на плате за выброс загрязненного воздуха; $\Delta П_{\text{загр.в-тв}}$ – экономия на плате за выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух; $V_{\text{реал.пр.}}$ – выручка от реализации продуктов разделения (очистки) загрязненных технологических воздушных потоков.

Приведенные затраты при этом рассчитываются по уравнению, аналогичному уравнению 2.

Предлагаемый эколого-экономический подход для конструирования пылеуловителей позволяет обеспечить высокую экономическую эффективность их функционирования за счет значительного сокращения: 1) объема потребления свежего воздуха, 2) объема выброса загрязненного воздуха, 3) массы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух; 4) за счет прибыли от реализации получаемых продуктов разделения (очистки) технологических воздушных потоков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Невский А.В., Мешалкин В.П., Шарнин В.А. Анализ и синтез водных ресурсосберегающих химико-технологических систем. – М.: Наука, 2004. 212 с.
2. Осадчий Ю.П., Федосов С.В., Невский А.В., Блиничев В.Н., Усанова О.А. Энергоресурсосберегающие технологии на базе мембранного разделения отработанных растворов. // Экология и промышленность России. 2009. № 6. С. 44–45.
3. Лапшина А.В., Невский А.В., Аكوпова О.Б., Гуюмджян П.П. Применение дезинтегратора в экологизации различных производств // В сб. Проблемы экогеоинформационных систем. – Иваново: ИГАСА, 2000. Вып. 1. С. 67–71.
4. Лапшина А.В., Невский А.В., Гуюмджян П.П. Дезинтегратор-абсорбер // В сб. Проблемы экогеоинформационных систем. – Иваново: ИГАСА, 2001. Вып. 2. С. 66–73.
5. Подрезов А.В., Чистяков Я.В., Чичура Т.М., Володин Н.И., Журавлева Ю.Н. Очистка газов от мелкодисперсной пыли // Экология и промышленность России. 2004. № 11. С. 20–22.
6. Смирнов Д.Е., Володин Н.И., Сугак А.В., Горпинченко А.В. Математическая модель сепарации твердых частиц в пылеуловителе-классификаторе // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. № 4. С. 75–76.
7. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. 336 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. 847 с.
9. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газов с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
10. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. 255 с.
11. Рахматулин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. № 2. С. 184–185.
12. Белоцерковский О.М., Белоцерковский С.М., Давыдов Ю.М., Ништ М.И. Моделирование отрывных течений на ЭВМ. – М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1984. 122 с.