

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИАПАЗОНА

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, К.В. Шалунова,
А.Н. Галахов, Р.Н. Голых

В статье рассмотрена конструкция усовершенствованного аппарата со встречно закрученными потоками (ВЗП) для улавливания готового нанодисперсного продукта. Особенностью усовершенствованной конструкции является введение в конструкцию двух источников УЗ колебаний, в качестве которых использовались пьезоэлектрические колебательные системы с дисковыми излучателями. Проведенный анализ аппарата ВЗП методом конечных элементов показал высокую эффективность разработанного центробежного аппарата, обеспечивающего до 90% улавливания частиц наноматериала.

Ключевые слова: акустическое воздействие, наноаэрозоль, коагуляция наночастиц, наноматериал производимых продуктов, аппарат ВЗП.

Введение

С развитием новых отраслей промышленности возникает задача высокоэффективного улавливания готового продукта из газовых сред. Особенно остро проблема улавливания готового продукта стоит в области нанотехнологий, пищевой, химической, горной промышленности.

Для улавливания готового продукта применяется широкий класс аппаратов сухой и мокрой пылеочистки, использующих различные механизмы сепарации (осадительные камеры, различные циклоны, электро и тканевые фильтры).

Однако область применения выше перечисленных аппаратов ограничена. Это связано с низкой эффективностью, необходимостью замены или чистки фильтрующего элемента, а иногда и с принципиальной невозможностью улавливания мелкодисперсных аэрозолей.

Наиболее распространенными из существующих пылеуловителей являются инерционные и центробежные аппараты, которые хорошо зарекомендовали себя при улавливании частиц в микронном диапазоне. Улавливание частиц в нанометровом диапазоне с использованием инерционных аппаратов оказывается малоэффективным. При этом, наложение внешних воздействий (таких, как паро-коагуляционное укрупнение частиц, изменение поверхностного натяжения) может оказывать заметное влияние на эффективность осаждения аэрозолей. Но при этом, возможно изменение исходных свойств готового про-

дукта, что недопустимо для его дальнейшего применения.

Увеличить эффективность работы инерционных и центробежных пылеуловителей без изменения исходных свойств готового продукта можно с помощью предварительной акустической коагуляции частиц до размеров частиц, при которых эффективность улавливания будет близка к 100%.

Исследования, ранее проводимые в этом направлении, дали положительные результаты, но столкнулись с трудностью создания источников акустических колебаний, а также защитой от шума обслуживающего персонала.

Возможным решением рассмотренной проблемы является коагуляция частиц под воздействием высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний (более 140 дБ) [1].

Для исследования эффективности процесса ультразвуковой коагуляции были проведены экспериментальные исследования с использованием диоксида кремния (Аэросил) в качестве модельной среды.

Выбор материала обусловлен рядом причин:

- наноразмерностью частиц, формируемых при производстве диоксида кремния и необходимостью улавливания наночастиц получаемого материала из газовой среды;
- частицы аэросила в значительной степени самопроизвольно агломерируют, поскольку диоксид кремния обладает сильно выраженными адгезионными свойствами [2-3];

– агломераты частиц имеют размер от 1 до 10 мкм и представляют собой пористый материал. Исходя из этого, для дальнейших расчётов плотность агломератов принимается равной насыпной плотности неуплотнённого диоксида кремния, равной 50 г/дм³. При этом размер наименьших частиц аэросила составляет 50...60 нм, обладающих плотностью, равной 2200 кг/м³;

Из-за низкой плотности агломератов задача улавливания готового материала при помощи центробежных пылеуловителей еще больше усложняется.

Экспериментальное исследование процесса коагуляции частиц под воздействием УЗ колебаний

На первом этапе были проведены экспериментальные исследования для получения научных данных, необходимых для определения степени повышения эффективности улавливания наночастиц за счёт их укрупнения при воздействии высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний.

Для экспериментальных исследований процесса ультразвуковой коагуляции был использован ультразвуковой дисковый излучатель, выполненный в виде изгибно-колеблющегося диска, размеры и форма которого выбраны из условия обеспечения необходимой частоты и направленности излучения ультразвуковых колебаний. Используемый излучатель имел следующие технические характеристики:

- диаметр 320 мм;
- рабочая частота 21,5 кГц. [4]



Рисунок 1 – Внешний вид ультразвукового излучателя в комплекте с электронным генератором

Для подтверждения возможности коагуляции наночастиц был проведён эксперимент (рисунок 2), заключающийся в воздействии УЗ колебаниями в малой цилиндрической области (диаметром равным диаметру излучателя и высотой 400 мм) в режиме стоячей волны, с использованием отражателя.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2013



Рисунок 2 – Коагуляция наночастиц в стоячей волне

В ходе эксперимента агломерация частиц происходила за 1, 2 секунды ультразвукового воздействия. При этом, полученные агломераты располагались в узлах стоячей волны. Размеры получаемых агломератов достигают 5 мм в условном диаметре. К сожалению, получившиеся агрегаты обладают малой механической прочностью и при механическом воздействии легко диспергируются на более мелкие частицы.

Полученные предварительные результаты подтвердили возможность и показали целесообразность коагуляции частиц под воздействием ультразвуковых колебаний. При этом необходимо обеспечивать как можно больший уровень звукового давления.

Дальнейшие экспериментальные исследования процесса коагуляции проводились в коагуляционной камере. Лабораторная коагуляционная камера была выполнена в виде цилиндра длиной 2500 мм и диаметром 800 мм.

В ходе измерений уровня звукового давления в лабораторной коагуляционной камере установлено, что излучатель при 100% мощности электронного генератора позволяет создавать уровень звукового давления 140...145 дБ в большей части объёма коагуляционной камеры. При этом в фокусе, расположенном на расстоянии 10...15 см от излучателя, уровень звукового давления достигает 151 дБ. При этом ультразвуковой излучатель располагался по центру торца лабораторной коагуляционной камеры.

При наличии дополнительных воздушных потоков со скоростью 0,6 м/с наблюдается значительное уменьшение времени осаждения частиц при воздействии УЗ колебаниями, по сравнению с естественным осаждением. При этом обеспечивается ускорение

коагуляции до 2,14 раз (на 53 %) при 100% выходной мощности излучателя (что соответствует среднему звуковому давлению 145 дБ) и в 1,77 раз (на 43 %) при 75% мощности (что соответствует среднему звуковому давлению более 135 дБ). Это соответствует 3,06-кратной степени укрупнения по условному диаметру и 28-кратной степени укрупнения по массе.

На рисунке 3 приведены зависимости относительной счётной концентрации частиц от времени с потоками воздуха со скоростью до 5 м/с при различных мощностях УЗ воздействия (80% и 100%).

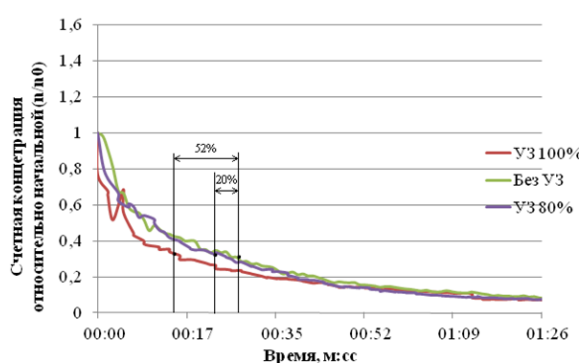


Рисунок 3 – Зависимости относительной счётной концентрации частиц от времени при различных мощностях УЗ с вентилятором

При мощности ультразвука до 100% (около 145 дБ) воздействие приводит к 2,1-кратному повышению эффективности осаждения частиц SiO₂ (на 52%, а степень укрупнения – 2,97-кратная по условному диаметру и 26-кратная по массе). Однако, в данном случае эффект от УЗ значительно выше, чем при естественном осаждении частиц, поскольку потоки воздуха, создаваемые «звуковым ветром», компенсируются практически полностью. При более высокой концентрации, соответствующей 200 г/м³, согласно результатам моделирования достигается более высокая степень укрупнения (до 6-ти раз).

Экспериментально полученные значения степени укрупнения используются в дальнейшем для расчёта траектории движения частиц в коагуляционной камере в системе конечно-элементного моделирования

Моделирование режимов работы аппарата ВЗП

Анализ функциональных возможностей инерционных и центробежных пылеулавливателей позволил установить, что аппараты со встречно закрученными потоками (ВЗП)

являются наиболее эффективными для исследования процесса сепарации наночастиц.

Исследования показывают, что аппараты ВЗП обладают существенными преимуществами перед другими центробежными пылеулавливателями:

- высокой степенью улавливания частиц тонкодисперсной пыли;
- слабой чувствительностью эффективности пылеулавливания к колебаниям нагрузки по газу и концентрации пыли в газе;
- меньшие потери давления в аппарате;
- возможность регулирования процесса пылеулавливания путем изменения соотношения расходов газа по каналам;
- обеспечением предельного диаметра (определяется как диаметр частиц, уловленных в аппарате с эффективностью 50 %) меньше, чем у аппаратов других типов. Эффективность улавливания частиц размером более 5 мкм достигает 100 %.

Несмотря на несомненные достоинства аппаратов ВЗП, эффективность улавливания частиц, размером менее 100 нм невелика.

Пылеуловитель со встречно закрученными потоками работает следующим образом: первичный запылённый поток входит в нижнюю часть аппарата через тангенциально расположенный патрубок, закручивается и в его цилиндрической или конической части происходит разделение на высоко и низкоконцентрированные потоки. Первый, вращается в периферийной зоне завихрителя, а второй, с пониженной концентрацией, в центральной части.

Через тангенциально расположенный патрубок в верхней части уловителя сверху вниз, вращаясь, движется вторичный запылённый поток. Этот поток перемещает частицы уловленной пыли в бункер. Очищенный воздух по коаксиальному воздухопроводу верхней части аппарата выносятся из пылеуловителя. Вращение потоков внутри аппарата имеет одно направление.

Для практической реализации процесса сепарации частиц диоксида кремния с одно-временной коагуляцией был выбран аппарат ВЗП, на основе которого реализовалась коагуляционная камера.

Моделирование работы разработанных конструкций коагуляционных камер проводилось посредством конечно элементного анализа. Начальный расчет эффективности конструкций (для устранения значительных недочетов, допущенных при разработке конструкции) проводился при диаметре частиц дисперсной фазы, равном 10 мкм. Это значе-

ние диаметра частиц является критичным для большинства существующих конструкций инерционных пылеуловителей. Затем расчет последовательно повторялся для частиц диаметрами 5 мкм, 1 мкм и 0,5 мкм.

При расчетах задавался суммарный (по первичному и вторичному потокам) входной расход газа, равный 500 м³/час. Соотношение массового расхода пылегазовой смеси между первичным и вторичным потоками поддерживалось на уровне 0,64. Это соотношения указывается в ряде работ, посвященных определению эффективности работы пылеуловителей на основе ВЗП [5].

После проведения ряда модельных расчетов различных конструкций была определена оптимальная конструкция (рисунок 4).

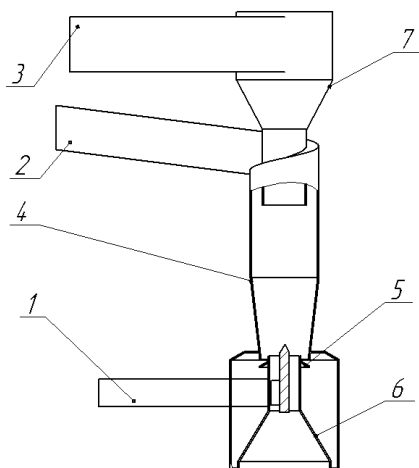


Рисунок 4 – Оптимальная конструкция коагуляционной камеры: 1 – входной закручиватель первичного запыленного потока; 2 – входной закручиватель вторичного запыленного потока; 3 – патрубок вывода очищенного газа; 4 – корпус коагуляционной камеры; 5 – отбойная шайба бункера; 6 – нижний концентрирующий конус; 7 – верхний концентрирующий конус

Результаты расчетов разработанной оптимальной конструкции коагуляционной камеры показаны на рисунках 5 и 6. Размер дисперсных частиц 1 мкм.

Эффективность работы рассчитанной конструкции составляет 90%. Более высокую степень улавливания получить не представляется возможным ввиду малой плотности агломератов.

На последнем этапе были проведены расчеты для частиц размером 0,5 мкм (рисунок 7).

Если принять во внимание, что на вход коагуляционной камеры будут поступать частицы размером не менее 0,5 мкм и время их пребывания в коагуляционной камере со-

ставляет не менее 0,6 сек., то за счет наличия УЗ воздействия частицы укрупнятся до размеров 1,4 мкм (согласно теоретическим расчетам и экспериментальным данным, степень УЗ укрупнения частиц за время 0,6 сек. составляет 2,7 раз.), то расчетная эффективность коагуляционной камеры составит не менее 90%.

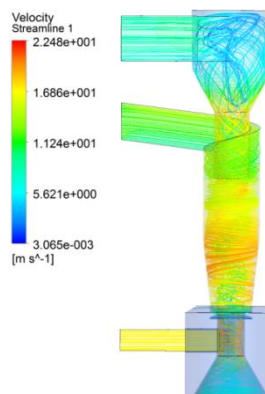


Рисунок 5 – Картина течения газа в объеме коагуляционной камеры диаметром 250 мм

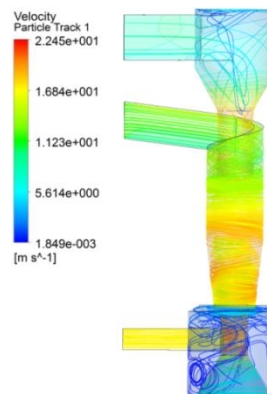


Рисунок 6 – Траектории движения дисперсных частиц 1 мкм в коагуляционной камере

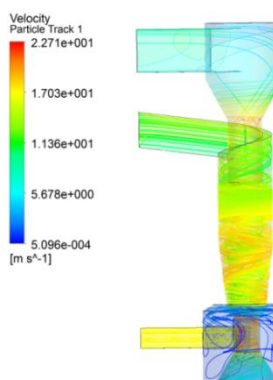


Рисунок 7 – Траектории движения дисперсных частиц размером 0,5 мкм

Расчетная эффективность улавливания составляет 87%.

В приведенных расчетах не учитывалась самопроизвольная коагуляция частиц, которая должна обеспечить большую степень укрупнения частиц и, следовательно, более высокую эффективность разработанной конструкции, что может быть подтверждено только в производственных условиях.

Заключение

В результате проведенных работ получены следующие результаты:

–проведенные экспериментальные исследования процесса ультразвуковой коагуляции частиц под действием ультразвуковых колебаний подтвердили эффективность и целесообразность УЗ коагуляции частиц;

–теоретически установлено что степень укрупнения частиц при воздействии ультразвуковых колебаний с уровнем звукового давления 145 дБ возрастает в 3 раза по условному диаметру частиц в течении первых 2 секунд УЗ воздействия при концентрации 50 г/м³ и до 6-ти раз при концентрации 200 г/м³;

–проведены экспериментальные исследования процесса коагуляции, подтвердившие результаты теоретических исследований;

–проведено моделирование режимов работы коагуляционной камеры на основе аппарата ВЗП, показавшее эффективность улавливания дисперсных частиц размером

0,5 мкм и менее с эффективностью 87% (без УЗ колебаний) и не менее 90% с учетом коагуляции частиц при наличии УЗ воздействия;

– разработана конструкция коагуляционной камеры на основе пылеуловителя со встречными закрученными потоками, рекомендуемого для промышленного применения;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Шалунов А.В. Акустическая коагуляция аэрозолей [Текст] / А.В. Шалунов, В.Н. Хмелёв, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – 2008. – №1-2. – С.66-75.

2.Савченко, Н.С. Синтез и исследование свойств конструктивных и функциональных материалов на основе оксида кремния IV [Текст]. Автореферат диссертации канд. хим. наук. / Томск, 2008 г.

3.Седунов, С.Г. Разработка способа получения наноразмерных коллоидных систем на основе диоксида кремния [Текст] / С.Г. Седунов, М.П. Ступникова, О.М. Демидов, К.А. Тараскин, А.В. Козырева, Е.В. Филатов // Молекулярные технологии. Т. 5. – Дубна: Научно-исследовательский институт прикладной акустики. – 2008. – С. 263-275.

4.Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки, - 2010, - Вып.1 с.148-153

5.Латкин, А.С. Гидродинамика и тепломассообмен в вихревых аппаратах [Текст] /А.С. Латкин. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ 2005. – 159 с.

УДК 544.77:532.584.22

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАНОРАЗМЕРНОГО АЛЮМИНИЯ В ЭКС С АКТИВНЫМ СВЯЗУЮЩИМ

М.В. Комарова, В.Ф. Комаров, Н.В. Бычин

Приведены результаты термогравиметрических исследований смесей активного связующего и наноразмерных порошков алюминия, имеющих различные защитные покрытия. Описаны особенности морфологических изменений агломератов наноразмерных частиц алюминия, пассивированных жидкими реагентами. Изложен метод, позволяющий выбрать оптимальный вариант защитного покрытия для применения наноалюминия в топливных системах на основе активного связующего.

Ключевые слова: наноразмерный алюминий, защитные покрытия, энергетические конденсированные системы (ЭКС).

Введение

Применение наноразмерного алюминия в качестве одного из компонентов современного ракетного топлива на сегодняшний день

достаточно проблематично, что связано в основном с высокой химической активностью наноалюминия и склонностью к агломерации. Высокая химическая активность наноразмер-