

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ГАЗООЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.Н. Галахов, Р.Н. Голых
ООО "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ"

Статья посвящена созданию газоочистительного оборудования для улавливания дисперсных частиц нанометрового размера. Эффективность сепарации разработанного оборудования для улавливания дисперсных частиц с начальным размером 200 нм при расходе пылегазового потока 1000 м³/час, концентрацией частиц 200 г/м³ и плотностью исходных частиц 2000 кг/м³ составляет не менее 95%. Эффективность сепарации разработанного оборудования достаточна для использования установки в промышленных условиях.

Ключевые слова: ультразвук, колебательная система, дисковый излучатель, коагуляция, аппарат ВЗП, агломератор, пылегазоочистительное оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромное внимание уделяется решению проблемы эффективной очистки загрязненных газов и улавливания готовых продуктов, формируемых в газовых средах в виде наночастиц из различных по физико-химическим свойствам материалов. Ярким примером является необходимости улавливания частиц наночастиц диоксида кремния SiO₂ (аэросила), получаемого при взаимодействии газообразного четыреххлористого кремния с парами воды.

Для решения проблемы улавливания дисперсных частиц применяются аппараты, действие которых основано на использовании различных механизмов сепарации. Многочисленные исследования и разработки привели к созданию самых эффективных устройств центробежной или инерционной сепарации [1–2]. Наряду с высокой эффективностью при сепарации частиц микрометрового диапазона, такие аппараты характеризуются низкой эффективностью при необходимости улавливания частиц с размерами менее 100 нм.

Одним из путей повышения эффективности улавливания наночастиц может стать использование внешнего энергетического воздействия, способного обеспечить дополнительное движение наночастиц для их коагуляции. Поэтому, перспективным направлением увеличения эффективности улавливания дисперсных частиц нанометрового размера является их коагуляция в акустических полях высокой интенсивности [3].

Для обеспечения высокой эффективности сепарации дисперсных частиц нанометрового размера было предложено разработать двухступенчатый комплекс газоочистительного оборудования. Первая ступень комплекса может выполняться в виде горизонтально-центробежного циклона с двумя ультразвуковыми

дисковыми излучателями на частоту 20–24 кГц [4] и использоваться для предварительной коагуляции частиц с начальными размерами 100...200 нм.

Вторая ступень очистки может быть выполнена в виде аппарата со встречно-закрученными потоками (ВЗП), дополненного двумя УЗ дисковыми излучателями, позволяющими одновременно производить сепарацию с УЗ обработкой пылегазового потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ

Для доказательства повышения эффективности коагуляции под действием ультразвуковых колебаний были проведены экспериментальные исследования. В качестве источника ультразвука использовался ультразвуковой излучатель, выполненный в виде изгибно-колеблющегося диска, имеющий следующие технические характеристики: диаметр 320 мм; рабочая частота 21,5 кГц; максимальное значение звукового давления 151 дБ [5]. В качестве исследуемого объекта использовалась газодисперсная взвесь частиц диоксида кремния с известным значением среднего условного диаметра частиц. Изменение значения этого параметра позволили оценить эффективность улавливания частиц и определить степень повышения эффективности коагуляции при наложении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Исследования процесса коагуляции были проведены в лабораторной коагуляционной камере цилиндрической формы длиной 2500 мм и диаметром 800 мм и позволили выявить (рисунок 3) зависимости относительной счётной концентрации частиц от времени в потоках воздуха до 5 м/с при различных мощностях УЗ воздействия (80% и 100%). В ходе исследований было установлено, что процесс УЗ коагуляции можно условно разделить на два этапа. На первом этапе, при высокой концентрации частиц в потоке воздуха, дви-

жущегося со скоростью до 5 м/с, воздействие на взвешенные частицы ультразвуковыми колебаниями за первые две секунды приводит к 1,73-кратному повышению эффективности осаждения частиц SiO₂ (на 43%). При этом степень укрупнения – 3,2-кратная по условному диаметру и 33-кратная по массе).

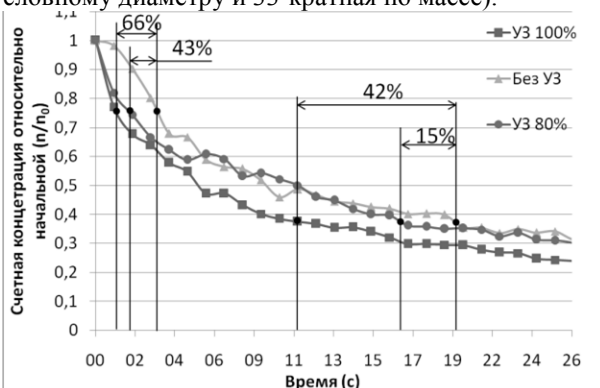
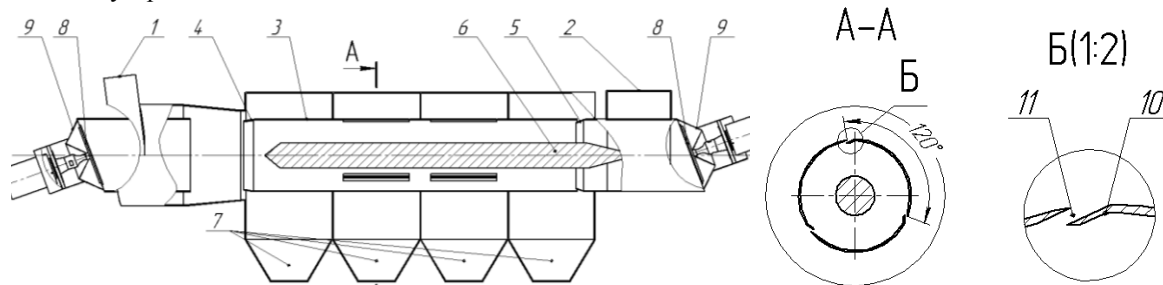


Рис. 1. Зависимости относительной счётной концентрации частиц SiO₂ от времени с воздушными потоками со скоростью до 5 м/с

Второй этап реализуется при меньшей концентрации частиц и при ультразвуковом воздействии с уровнем звукового давления до 142 дБ эффект практически не проявляется. Это обусловлено низкой концентрацией, малой плотностью частиц и недостаточным уровнем звукового давления.

Однако, при ультразвуковом воздействии с уровнем 145 дБ происходит 1,73-кратное повышение эффективности осаждения частиц SiO₂ (на 42%, а степень укрупнения – 3,2-кратная по условному диаметру). При более высокой исходной концентрации, соответствующей 200 г/м³, достигается более высокая степень укрупнения (до 8-ти раз). Дальнейшее повышение уровня звукового давления также обеспечивает повышение эффективности коагуляции.

Таким образом, ультразвуковое воздействие способно обеспечить существенное повышение эффективности коагуляции и должно быть использовано в практических устройствах.



1 – входной закручиватель; 2 – выходной патрубок; 3 – камера сепарации; 4 – входной диффузор; 5 – диффузор выходного патрубка; 6 – обтекатель; 7 – бункеры; 8 – дисковые излучатели; 9 – отражатели; 10 – фронтальная кромка; 11 – щелевой зазор

Рис. 2. Эскиз разработанного агломератора

СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОАГУЛЯЦИИ (АГЛОМЕРАТОРА)

При создании устройства предварительной коагуляции поставлена задача обеспечения предварительного укрупнения до размера более 2 мкм получаемых при производстве диоксида кремния частиц с размером 200 нм (плотность 2200 кг/м³).

В связи с этим к агломератору были предъявлены следующие требования:

1. Форма и размеры агломератора должны обеспечивать минимально необходимое и достаточное для эффективной коагуляции время пребывания частиц в ультразвуковом поле;
2. Ультразвуковые дисковые излучатели должны обеспечивать равномерное распределение ультразвуковых колебаний в объеме устройства;
3. Минимальное гидравлическое сопротивление аппарата при заданной входной скорости пылегазовой смеси и максимальное расслоение газодисперсной смеси для увеличения эффективности коагуляции частиц в газопылевом слое, сконцентрированном у внутренних стенок аппарата.

Для выбора оптимальной конструкции агломератора, обеспечивающего максимальную эффективность улавливания частиц было проведено:

- 1) моделирование процесса сепарации частиц из пылегазового потока
- 2) моделирования распределения уровня звукового давления в объеме агломератора, для определения оптимального размещения ультразвуковых излучателей.

Анализ эффективности различных вариантов аппарата в совокупности с исследованиями распределения интенсивности ультразвукового поля внутри объема агломератора позволил определить оптимальную конструкцию агломератора, схематично показанную на рисунке 2.

Все расчеты проводились при расходе пылегазового потока $1000 \text{ м}^3/\text{час}$, массовой концентрацией дисперсных частиц $200 \text{ г}/\text{м}^3$, плотности дисперсных частиц $2200 \text{ кг}/\text{м}^3$ с начальным размером 200 нм и плотностью получаемых агломератов материала $200 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Предложенный агломератор работает следующим образом. Через входной закручиватель 1 газовый поток, содержащий наночастицы, поступает в камеру сепарации 3. В результате движения по криволинейной траектории, под действием центробежных сил происходит его расслоение на концентрированный периферийный слой и внутренний слой потока с меньшей концентрацией частиц. Сформированный закрученный поток поступает во внутренний объем камеры сепарации. Внутри камеры сепарации агломератора дисперсные частицы попадают под действие акустического поля высокой интенсивности, сформированного УЗ дисковыми излучателями 8, установленными с торцов рабочего объема камеры сепарации. Воздействие акустического поля приводит к коагуляции частиц в концентрированном периферийном слое.

В результате этого дальнейшее выделение дисперсных частиц из пылегазового потока происходит эффективнее. На внутренней поверхности камеры агломератора с интервалом 120° расположены три продольные щели 11. Щелевые зазоры сообщаются с двумя изолированными бункерами 7, образующими внешний корпус агломератора. Наталкиваясь на фронтальные кромки щелевых 10 зазоров, дисперсные частицы отбрасываются в изолированные бункеры 7. Ультразвуковые излучатели 8 установленные на торцах агломератора имеют отражатели 9 для повышения эффективности выхода акустической энергии.

Для обеспечения максимальной эффективности процесса коагуляции были определены оптимальный угол установки излучателей и расстояние между ними, обеспечивающее резонансное усиление и наиболее равномерное распределение интенсивности колебаний в объеме камеры сепарации агломератора. Средний уровень звукового давления внутри объема агломератора равен 145 дБ , что является достаточным для эффективной коагуляции дисперсных частиц.

Эффективность сепарации и степень укрупнения частиц в разработанном агломераторе, с учетом рас-

четных и экспериментальных данных степени укрупнения частиц [6] иллюстрируется рисунком 3.

Результаты проектирования позволили установить:

- предложенная конструкция агломератора, способного без интенсифицирующего УЗ воздействия обеспечить эффективность улавливания дисперсных частиц плотностью $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ с размером 1 мкм – 75% ; с размером $0,5 \text{ мкм}$ – 53% ; с размером $0,2 \text{ мкм}$ – 47% ; и с размером $0,1 \text{ мкм}$ – 28% ;

- предложенный агломератор, при наличии интенсифицирующего воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ обеспечивает эффективность улавливания частиц: с начальным размером 1 мкм – 93% ; с начальным размером $0,5 \text{ мкм}$ – 81% ; с начальным размером $0,2 \text{ мкм}$ – 56% ; и на частицах $0,1 \text{ мкм}$ – 50% ;

- агломератор, за счет ультразвукового воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ , позволяет укрупнять частицы в 8 раз, т.е. при начальном размере дисперсных частиц в 200 нм позволяет коагулировать частицы до размера $1,6 \text{ мкм}$.

К сожалению, эффективность сепарации получаемых агломератов с начальным размером 200 нм не велика ($50\text{-}60\%$). Поэтому для увеличения эффективности улавливания готового продукта необходима дальнейшая сепарация с одновременной коагуляцией.

СОЗДАНИЕ АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

Как было отмечено, аппараты со встречно закрученными потоками (ВЗП) являются наиболее эффективными для практической реализации процесса сепарации наночастиц. Несмотря на несомненные достоинства аппаратов ВЗП, эффективность сепарации частиц, размером менее 200 нм невелика.

После проведения ряда модельных расчетов различных конструкций была определена оптимальная конструкция устройства центробежно-акустического улавливания аэрозолей, основанного на аппарате ВЗП, а также оптимальное соотношение массового расхода пылегазовой смеси между первичным и вторичным потоками, которое составило 0.64 (рисунок 4А).

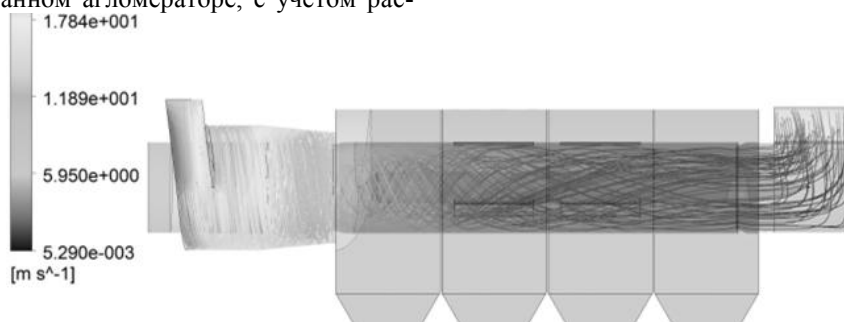
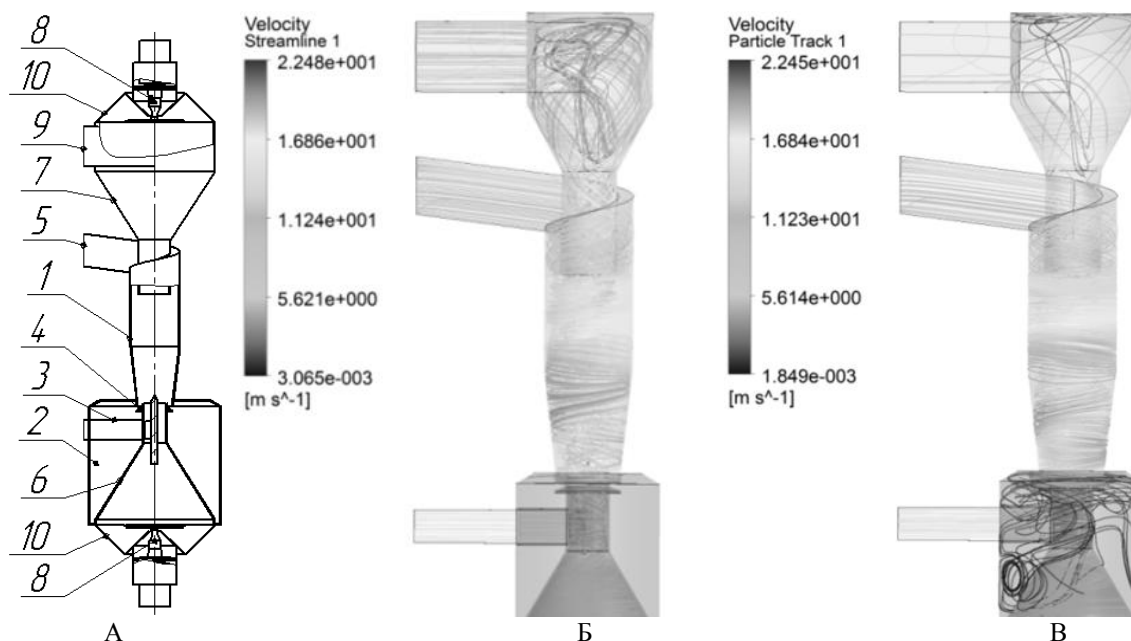


Рис. 3. Картина течения газа в объеме агломератора



1 – камера сепарации; 2 – бункер; 3 – входной закручиватель первичного потока; 4 – отбойная шайба; 5 – входной закручиватель вторичного запыленного потока; 6 – нижний концентрирующий конус; 7 – верхний концентрирующий конус; 8 – ультразвуковые дисковые излучатели; 9 – патрубок вывода очищенного газа; 10 – отражатели.

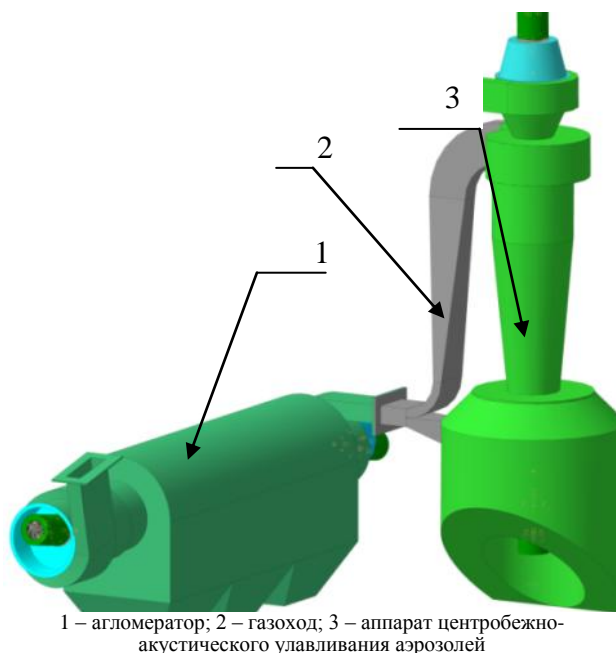
Рис. 4. Конструктивный вид (А), траектории движения газа (Б) и дисперсных частиц 1 мкм (В) в аппарате центробежно-акустического улавливания аэрозолей

С целью определения эффективности сепарации аппаратом центробежно-акустического улавливания аэрозолей и степени укрупнения дисперсных частиц, с учетом рассчитанного уровня звукового давления внутри объема камеры сепарации и полученных расчетных экспериментальных данных [6] был проведен анализ эффективности его работы. Результаты одного из расчетов разработанной оптимальной конструкции аппарата при сепарации дисперсных частиц с размером 1 мкм показаны на рисунках 4Б и 4В.

Согласно результатам моделирования время пребывания частиц в ультразвуковом поле составляет не менее 0,6 с. Эффективность сепарации аппарата центробежно-акустического улавливания без УЗ воздействия на частицах с начальным размером 1,6 мкм составляет не менее 85%. При наличии УЗ воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ в объеме аппарата, частицы увеличиваются в 3 раза (частицы укрупняются до размеров 4,8 мкм), при этом эффективность сепарации частиц с начальным размером 1,6 мкм составила 95%.

Разработанная конструкция комплекса газоочистительного оборудования показана на рисунке 5.

Комплекс газоочистительного оборудования обеспечивает повышение эффективности сепарации частиц с начальным размером 200 нм с 80 % без УЗ воздействия до не менее 95%, при наличии УЗ воздействия.



1 – агломератор; 2 – газоход; 3 – аппарат центробежно-акустического улавливания аэрозолей

Рис. 5. Модель агломератора в сборе с аппаратом центробежно-акустического улавливания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы создан комплекс газоочистительного оборудования для улавливания дисперсных частиц нанометрового размера с интенсифицирующим ультразвуковым воздействием и установлено, что:

– воздействие ультразвуковыми колебаниями со средним уровнем звукового давления 145 дБ на пыле-

газовую смесь обеспечивает укрупнение в 3 раза по условному диаметру частиц в течение первых 2 секунд при концентрации 50 г/м³ и до 8-ти раз при концентрации 200 г/м³;

– наличие интенсифицирующего УЗ воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ в объеме агломератора обеспечивает улавливание частиц с начальным размером 200 нм с эффективностью 56 %, при этом, за счет предварительной коагуляции аппарат позволяет укрупнить частицы в 8 раз, с начальным размером частиц 200 нм;

– эффективность сепарации агломератов с начальным размером 1.6 мкм в аппарате центробежно-акустического улавливания составляет не менее 80 % без УЗ колебаний и не менее 95% с учетом коагуляции частиц при наличии УЗ воздействия;

– эффективность сепарации комплекса газоочистительного оборудования для улавливания дисперсных частиц с начальным размером 200 нм при наличии УЗ воздействия в агломераторе и аппарате центробежно-акустического улавливания составляет не менее 95%, которая достаточна для использования установки в промышленных условиях для получения диоксида кремния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шиляев М. И. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямоточных циклонов [Текст] / А. М. Шиляев, П. В. Афонин, Н. А. Стрельникова // Изв. вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. – 1999. - №8.

2. Вальдберг А.Ю., Технология пылеулавливания [Текст] / Л.М. Исаинов, Э.Я. Тарат // Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 192 с.

3. 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.

4. Хмелев, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.

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

6. Нестеров В.А. Разработка конструкции аппарата центробежно-акустического улавливания аэрозолей наноразмерного диапазона [Текст] / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, А.Н. Галахов, Р.Н. Голых // Ползуновский вестник. – 2013. – №1. – С.156-160.

Хмелёв Владимир Николаевич. – д.т.н., профессор, зам. директора по НР, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru;

Шалунов Андрей Викторович – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Нестеров Виктор Александрович – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Галахов Антон Николаевич – инженер, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: galakh@bti.secna.ru.

Голых Роман Николаевич – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.