

Разработка Агломератора Для Повышения Эффективности Сепарации Частиц Нанометрового Размера

Владимир Н. Хмелев, *Senior Member*, IEEE, Антон Н. Галахов, Андрей В. Шалунов, Виктор А. Нестеров, Роман Н. Голых, Ксения В. Шалунова
Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета и. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – Статья посвящена разработке агломератора для повышения эффективности сепарации дисперсных частиц нанометрового размера. Разработанный агломератор обеспечивает предварительную коагуляцию за счет ультразвукового воздействия и позволяет укрупнить частицы до 8 раз при производительности 1000 м³/час, с концентрацией до 200 г/м³, плотностью агломератов материала 200 кг/м³ и начальным размером частиц 200 нм. Это обеспечивает существенное увеличение эффективности аппарата центробежно-акустического улавливания.

Ключевые слова – Ультразвук, колебательная система, дисковый излучатель, коагуляция, аппарат ВЗП, агломератор.

I. ВВЕДЕНИЕ

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

Многочисленные исследования и разработки, направленные на решение проблемы сепарации частиц нанометрового размера основанных на центробежной или инерционной сепарации не привели к созданию эффективных средств пылеулавливания [1 – 3]. Поэтому решением этой проблемы может являться использование дополнительных видов высокоэффективного энергетического воздействия, к которым относится энергия УЗ колебаний. Проведенные работы позволили разработать аппарат центробежно-акустического улавливания аэрозолей, основанного на аппарате со встречно-закрученными потоками (ВЗП) с одновременным воздействием ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности [4]. К сожалению, разработанный аппарат не смог обеспечить коагуляцию дисперсных частиц размером 200 нм до 1-2 мкм, при которых эффективность сепарации будет близка к 100%. Это обусловлено тем, что время пребывания частиц в аппарате ВЗП, в течение которого происходит воздействие

ультраузвуковыми колебаниями, недостаточно для обеспечения необходимой степени укрупнения частиц.

В связи с этим, для увеличения эффективности улавливания дисперсных частиц нанометрового размера в устройствах со встречно-закрученными потоками и одновременным УЗ воздействием необходимо производить предварительную коагуляцию частиц в пылегазовом потоке, поступающем на вход аппарата.

При создании устройства предварительной коагуляции (агломератора) необходимо учитывать, что получаемые при производстве диоксида кремния частицы имеют размер 200 нм (плотность 2200 кг/м³), а формируемые в нем агломераты частиц должны иметь размер более 2 мкм. [5]

В связи с этим к агломератору предъявляются 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 максимальной интенсивности ультразвукового воздействия 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.

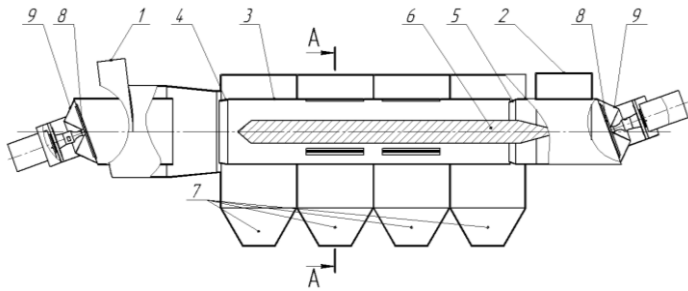
II. РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ АГЛОМЕРАТОРА

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

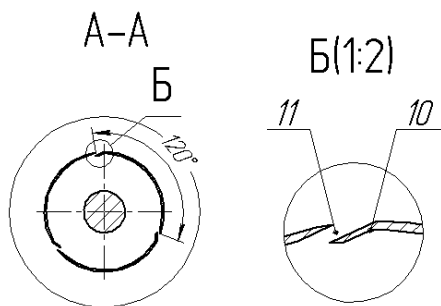
Анализ ряда модельных расчетов различных вариантов аппарата в совокупности с исследованиями распределения

интенсивности ультразвукового поля внутри объема агломератора позволил определить оптимальную конструкцию агломератора (см. Рис.1).



1 – входной закручиватель потока; 2 – выходной патрубок (раскручиватель потока); 3 – камера сепарации агломератора; 4 – входной диффузор; 5 – диффузор выходного патрубка; 6 – обтекатель;
7 – бункеры; 8 – дисковые излучатели; 9 – отражатели
Рис. 1. Эскиз разработанного агломератора

Размещение и форма щелевых зазоров показана на Рис.2.



10 – фронтальная кромка щелевого зазора;
11 – щелевой зазор

Рис. 2. Размещение и форма и расположение щелевых зазоров

Агломератор работает следующим образом. Газовый поток, содержащий наночастицы, поступает в камеру сепарации 3 через входной закручиватель потока 1. В результате движения по криволинейной траектории, под действием центробежных сил происходит его расслоение на концентрированный периферийный слой и внутренний слой пылегазового потока с меньшей концентрацией частиц. Коническая сепарационная часть закручивателя 1 позволяет улучшить условия расслоения из-за того, что осаждение пыли происходит при безотрывном движении пылегазового потока с нарастающей скоростью по плавно убывающему радиусу кривизны. Часть крупных частиц, обладающих большей массой и, соответственно, большей инерцией, попадает в первый бункер через кольцевой зазор, образованный внутренней поверхностью закручивателя 1 и входным диффузором камеры сепарации 4. Сформированный закрученный поток поступает во внутренний объем камеры сепарации агломератора.

Внутри камеры сепарации агломератора дисперсные частицы попадают под действие акустического поля высокой интенсивности, сформированного ультразвуковыми дисковыми излучателями 8, установленными с торцов рабочего объема камеры сепарации агломератора.

Воздействие акустического поля приводит к интенсивной коагуляции частиц в концентрированном периферийном слое за счет меньших расстояний между частицами. В

результате чего дальнейшее расслоение дисперсных частиц из пылегазового потока происходит эффективнее [6].

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.

Достигая внутренней поверхности камеры сепарации, дисперсные частицы наталкиваются на фронтальные кромки щелевых 10 зазоров и отбрасываются в изолированные бункеры 7.

Для усиления закручивания газового потока и исключения уноса частиц, на всю длину камеры сепарации агломератора установлен профилированный обтекатель, обеспечивающий отсечение газодисперсного потока к внешней границе агломератора.

При достижении выходного раскручивателя потока 2 часть дисперсных частиц, попадающих в последний бункер через кольцевой зазор между внутренней поверхностью камеры сепарации агломератора 3 и диффузором выходного патрубка 5.

Ультразвуковые излучатели 8 устанавливаются на торцах агломератора. С тыльной стороны излучателей установлены отражатели 9 специальной формы для переотражения УЗ колебаний и повышения эффективности выхода акустической энергии. Дополнительно, часть энергии излучается через кольцевой зазор между излучателем и внутренней поверхностью камеры сепарации в рабочий объем агломератора, вызывая увеличение уровня звукового давления.

Поскольку уровень звукового давления и равномерность его распределения являются важнейшими параметрами при ультразвуковой коагуляции дисперсных частиц, то для обеспечения максимальной эффективности процесса коагуляции было проведено исследование распределения интенсивности ультразвукового поля, с целью определения оптимального расположения дисковых излучателей.

При проведении исследований распределения интенсивности ультразвуковых колебаний внутри объема каждой конструкции агломератора за начальные условия значений звукового давления, были приняты параметры ультразвукового излучателя, выполненного в виде изгибно-колеблющегося диска. Размеры и форма дискового излучателя выбраны из условия обеспечения необходимой частоты ультразвуковых колебаний, при которой ультразвуковая коагуляция частиц нанометрового размера происходит наиболее интенсивно. Используемый излучатель (см. Рис.3) имел следующие технические характеристики:

- диаметр 320 мм;
- рабочая частота 21,5 кГц;
- максимальное значение звукового давления 151 дБ. [7]



Рис. 3. Внешний вид ультразвукового излучателя в комплекте с электронным генератором

С целью ускорения расчета, распределение акустического поля определялось только в основных внутренних объемах разработанной конструкции агломератора.

В результате моделирования ультразвукового поля определены оптимальный угол установки излучателей между осью вращения ультразвуковой колебательной системы и осью симметрии камеры сепарации равный 30° и расстояние между ними, обеспечивающее резонансное усиление и наиболее равномерное распределение интенсивности колебаний в объеме камеры сепарации агломератора (см. Рис.4).

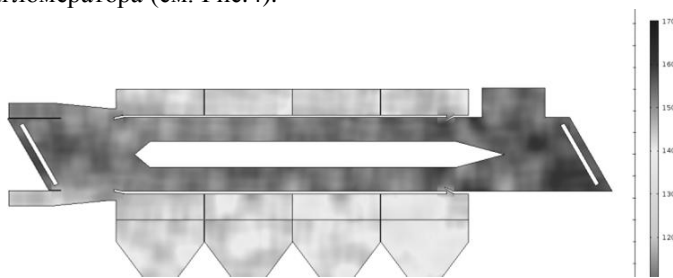


Рис. 4. Распределение уровня звукового давления

Из представленных результатов моделирования средний уровень звукового давления внутри объема агломератора равен 145 дБ.

Этот уровень воздействия достаточен для эффективной коагуляции дисперсных частиц, находящихся в газовой среде, т.е. для образования агломератов.

С целью определения эффективности сепарации разработанной конструкции агломератора и степени укрупнения дисперсных частиц, с учетом рассчитанного уровня звукового давления внутри объема камеры сепарации и полученных расчетных экспериментальных данных степени укрупнения частиц [4] был проведен анализ эффективности работы агломератора.

Полученные результаты показаны на Рис.5 и Рис.6.

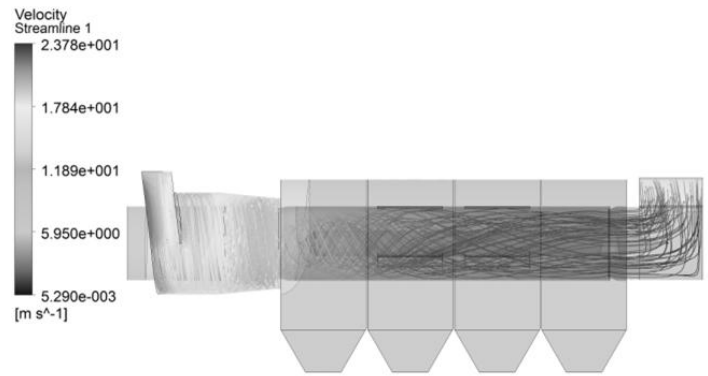


Рис. 5. Картина течения газа в объеме агломератора

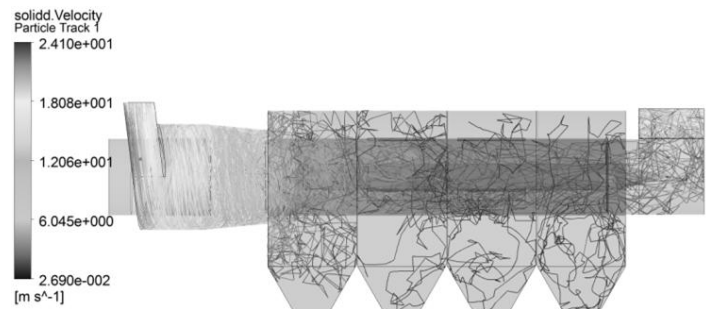


Рис. 6. Траектории движения дисперсных частиц 0,2 мкм

По результатам моделирования установлено, что эффективность улавливания разработанной конструкции агломератора без учета УЗ воздействия составляет: на частицах 1 мкм – 75 %; на частицах 0,5 мкм – 53 %; на частицах 0,2 мкм – 47 %; и на частицах 0,1 мкм – 28 %.

Время пребывания частиц в объеме агломератора составляет 2с, при производительности 1000 м³/час и концентрации частиц 200 г/м³. За это время, согласно полученным результатам моделирования будет обеспечено 8-кратное укрупнение дисперсных частиц.

Моделирование работы агломератора при наличии интенсифицирующего ультразвукового воздействия, с учетом того, что плотность получаемых агломератов снижается до 200 кг/м³, показало возможность обеспечения эффективности улавливания частиц размером 1мкм – 93 %; на частицах 0,5 мкм – 81 %; на частицах 0,2мкм – 56 %; и на частицах 0,1 мкм – 50 %;

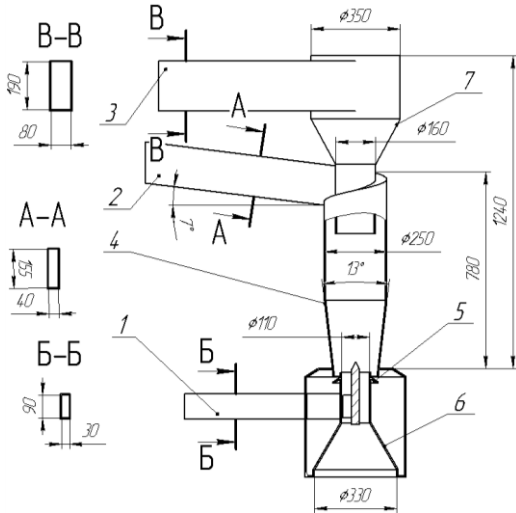
Таким образом, если размер частиц, подаваемых на вход агломератора, составляет 200 нм эффективность улавливания будет равна 50 %, а на выходе будут частицы с размером 0,8 мкм и менее с концентрацией до 100 г/м³.

III. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО УЛАВЛИВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

Поскольку агломератор обеспечивает предварительную коагуляцию наночастиц для увеличения эффективности улавливания дисперсных частиц нанометрового размера в аппарате центробежно-акустического улавливания аэрозолей необходимо проанализировать эффективность их совместной эксплуатации.

Для определения эффективности сепарации агломератов, получаемых на выходе агломератора, подаваемых на вход аппарата центробежно-акустического улавливания аэрозолей были проведены гидродинамические расчеты аппарата центробежно-акустического улавливания с учетом результатов моделирования работы агломератора и полученных расчетных экспериментальных данных степени укрупнения частиц.

Эскиз аппарата центробежно-акустического улавливания показан на Рис.7 [4].

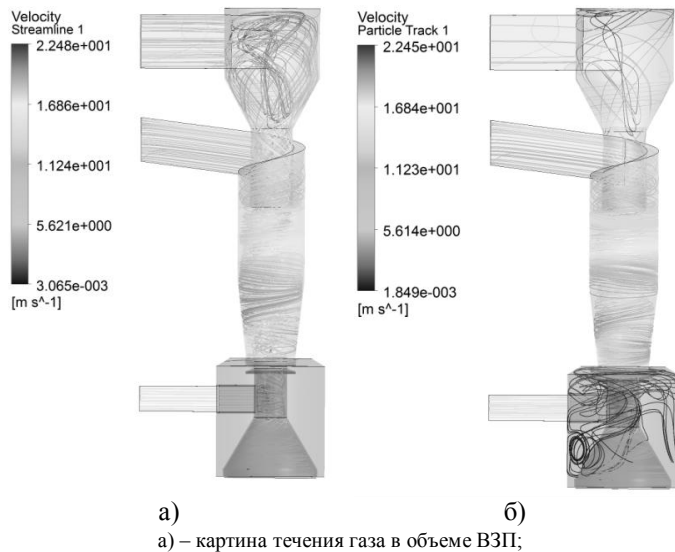


1 – входной закручиватель первичного запыленного потока; 2 – входной закручиватель вторичного запыленного потока; 3 – патрубок вывода очищенного газа; 4 – корпус коагуляционной камеры; 5 – отбойная шайба бункера; 6 – нижний концентрирующий конус; 7 – верхний концентрирующий конус

Рис. 7. Разработанная конструкция аппарата центробежно-акустического улавливания

При этом исследовалось движение воздушных потоков и дисперсных частиц с начальным размером 1 мкм, 0,5 мкм и 0,2 мкм в рабочем объеме аппарата с учетом их дополнительной коагуляции под действием УЗ колебаний.

Результаты моделирования с размером дисперсных частиц 1 мкм показаны на Рис.8.



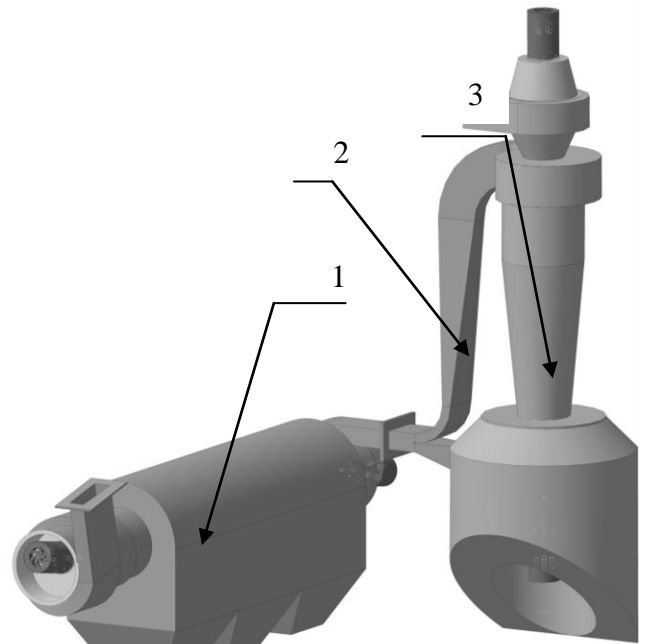
а) – картина течения газа в объеме ВЗП;
 б) – траектории движения дисперсных частиц 1 мкм

Рис. 8. Результаты моделирования работы разработанного пылеуловителя

Согласно результатам моделирования время пребывания частиц в ультразвуковом поле составляет не менее 0,6 сек.

Если принять во внимание, что на вход агломератора, который позволяет укрупнять частицы в 8 раз, будет поступать пылегазовый поток с частицами размером не менее 200 нм, а вход аппарата центробежно-акустического улавливания соединен с выходом агломератора. С учетом их дополнительной коагуляции под действием УЗ колебаний в последовательно соединенных агломераторе и аппарате центробежно-акустического улавливания частицы укрупнятся до размеров 4,8 мкм (согласно теоретическим расчетам и экспериментальным данным, степень УЗ укрупнения частиц за время 0,6 сек. составляет примерно 3 раза. [4]). Расчетная эффективность аппарата центробежно-акустического улавливания составит не менее 95%.

Полученные результаты совместной эксплуатации агломератора и аппарата центробежно-акустического улавливания позволили предложить и разработать комплекс газоочистного оборудования для улавливания частиц нанометрового размера центробежно-акустическим способом. Разработанная конструкция комплекса показана на Рис.9.



1 – агломератор; 2 – газоход с регулятором соотношения расходов первичного и вторичного потоков;
 3 – аппарат центробежно-акустического улавливания аэрозолей
 Рис. 9. Модель агломератора в сборе с аппаратом центробежно-акустического улавливания

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований и разработок получены следующие результаты:

– моделирование режимов работы при различных размерах частиц позволило предложить конструкцию агломератора, способного без интенсифицирующего процесс УЗ воздействия обеспечить эффективность улавливания дисперсных на частицах 1 мкм – 75 %; на частицах 0,5 мкм – 53 %; на частицах 0,2 мкм – 47 %; и на частицах 0,1 мкм – 28 %;

– для обеспечения равномерности и максимального значения интенсивности ультразвукового воздействия (145 дБ) в предложенном агрегатере определены оптимальные: угол установки ультразвуковых дисковых излучателей и расстояние между ними.

– моделирование работы предложенного агрегатера при наличии интенсифицирующего ультразвукового воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ в объеме аппарата показало возможность обеспечения эффективности улавливания частиц размером 1 мкм – 93 %; на частицах 0,5 мкм – 81 %; на частицах 0,2 мкм – 56 %; и на частицах 0,1 мкм – 50 %;

– установлено, что агрегатер для предварительной коагуляции позволяет за счет ультразвукового воздействия укрупнить частицы в 8 раз при производительности 1000 м³/час, с концентрацией 200 г/м³, плотностью агрегатов материала 200 кг/м³ и начальным размером частиц 200 нм;

– показано, что при последовательном соединении агрегатера и разработанного ранее аппарата центробежно-акустического улавливания, основанного на пылеуловителе со встречно-закрученными потоками эффективность сепарации дисперсных частиц размером 200 нм из пылегазового потока, составляет 95%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вальдберг А.Ю., Технология пылеулавливания [Текст] / Л.М. Исянов, Э.Я. Тарат // Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 192 с.
- [2] Тарасенко А.П. Новый центробежный сепаратор с коническими рабочими органами/ А.П. Тарасенко, А.Н. Коноплин// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. - №12. – С.6 – 8.
- [3] Шияев М. И. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямоточных циклонов [Текст] / А. М. Шияев, П. В. Афонин, Н. А. Стрельникова // Изв.вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. – 1999.- №8.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.