

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.Н. Галахов

ООО "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ"

Статья посвящена созданию и исследованию функциональных возможностей газоочистительного оборудования для улавливания дисперсных частиц нанометрового размера. Экспериментально установлено, что эффективность разработанного пылеуловителя при улавливании дисперсных частиц с начальным размером 0,2 мкм при расходе пылегазового потока 0,22 м³/с, концентрацией частиц 200 г/м³ и плотностью исходных частиц 2000 кг/м³ составляет не менее 95%.

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 необходимость улавливания частиц диоксида кремния SiO₂. (аэросила), получаемого при взаимодействии газообразного четыреххлористого кремния с парами воды.

В настоящее время для этих целей применяются аппараты, действие которых основано на использовании различных механизмов сепарации, которые имеют определенные недостатки. Они связаны с низкой эффективностью, необходимостью замены или чистки фильтрующего элемента, а иногда и с принципиальной невозможностью улавливания высокодисперсных частиц.

На сегодняшний день уже можно утверждать, что многочисленные исследования и разработки, направленные на решение проблемы сепарации высокодисперсных частиц основанных на центробежном или инерционном воздействии не привели к созданию эффективных средств пылеулавливания.

Отсюда вытекает наиболее очевидный путь повышения эффективности газоочистительного оборудования – укрупнение частиц. Для этого необходимо использование внешнего энергетического воздействия, способного сообщить частицам дополнительное встречное движение для их объединения, т.е. коагуляции. Поэтому перспективным направлением увеличения эффективности сепарации высокодисперсных частиц является использование энергии ультразвуковых колебаний [1].

Ультразвуковая коагуляция является единственным известным способом на данное время, не вносящим изменения в химический состав или физические свойства коагулируемых частиц. Однако УЗ коагуляция для повышения эффективности сепарации высоко-

кодисперсных частиц не нашла широкого промышленного распространения в промышленности.

Причина заключается в том, что нет газоочистительного оборудования и технологических объемов, оптимизированных под УЗ излучатели и самих излучателей способных обеспечить УЗ поле с требуемыми характеристиками по частоте и уровню звукового давления.

И если задача создания высокоэффективных УЗ излучателей в настоящее время практически решена усилиями сотрудников ООО «ЦУТ», то проблема создания газоочистительного оборудования оптимизированного под УЗ излучение остается открытой [2].

Для решения указанной проблемы было предложено разработать двухступенчатый комплекс газоочистительного оборудования. Первая ступень (предварительной коагуляции) комплекса выполнена в виде горизонтального центробежного циклона с двумя ультразвуковыми дисковыми излучателями на частоте 20-24 кГц [3-4]. Основным назначением первой ступени является повышение эффективности коагуляции за счет увеличения времени пребывания частиц в УЗ поле. Также в первой ступени обеспечивается частичное разделение пылегазовой смеси и повышение концентрации в периферийном слое обеспечивается за счет центробежной силы, действующей на закрученный поток.

Вторую ступень очистки предложено выполнить в виде аппарата со встречно-закрученными потоками (ВЗП), дополненного двумя УЗ дисковыми излучателями. Такая конструкция позволяет одновременно производить высокоэффективную сепарацию с одновременной коагуляцией высокодисперсных частиц в пылегазовом потоке.

РАЗРАБОТКА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ – УСТРОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОАГУЛЯЦИИ (АГЛОМЕРАТОРА)

При создании первой ступени очистки – устройства предварительной коагуляции поставлена задача

обеспечения предварительного укрупнения частиц с 0,2 мкм до размера не менее 1,5 мкм. 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.

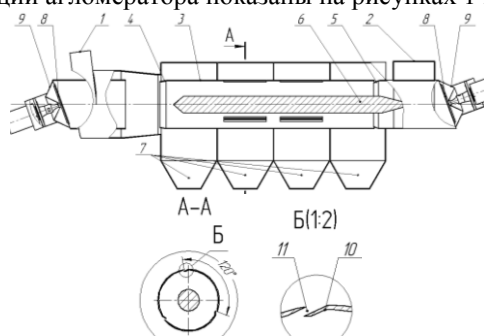
3. Минимальное гидравлическое сопротивление аппарата при заданной входной скорости пылегазовой смеси и максимальное расслоение газодисперсной смеси для увеличения эффективности коагуляции частиц в газопылевом слое, сконцентрированном у внутренних стенок аппарата.

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. Эскиз и расчетная картина течения пылегазового потока в разработанной конструкции агломератора показаны на рисунках 1 и 2.



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. 1. Эскиз разработанного агломератора

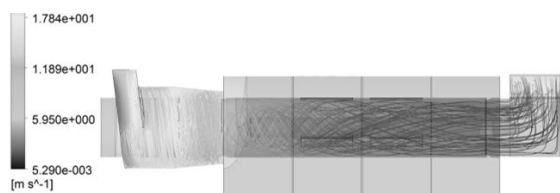


Рис. 2. Картина течения пылегазового потока в объеме агломератора

Все расчеты проводились при расходе пылегазового потока 0,28 м³/сек (1000 м³/час), массовой концентрацией дисперсных частиц 200 г/м³, плотности дисперсных частиц 2000 кг/м³ с начальным размером 0,2 мкм и плотностью получаемых агломератов материала 200 кг/м³ [5].

Разработанный 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.

В результате проведенных расчетов было установлено, что:

– предложенная конструкция агломератора, способного без интенсифицирующего УЗ воздействия обеспечить эффективность улавливания дисперсных частиц с плотностью 2000 кг/м³ с размером 1 мкм – 75%; с размером 0,5 мкм – 53 %; с размером 0,2 мкм – 37 %; и с размером 0,1 мкм – 28 %;

– время пребывания частиц в объеме агломератора составляет 2 с, при производительности 0,28 м³/с и концентрации 100 г/м³. За это время, согласно полученным результатам моделирования при наличии УЗ воздействия с уровнем звукового давления 145 дБ

будет обеспечено 8-кратное укрупнение дисперсных частиц, т.е. при начальном размере дисперсных частиц в 0,2 мкм позволяет коагулировать частицы до размера 1,6 мкм. Для этих частиц и будет рассчитана вторая ступень пылеуловителя. При этом обеспечивается эффективность улавливания частиц: с начальным размером 1 мкм – 93 %; с начальным размером 0,5 мкм – 81 %; с начальным размером 0,2 мкм – 68%; и на частицах 0,1 мкм – 59 %;

Поскольку, эффективность сепарации получаемых агломератов не велика (60-70%), то необходима дальнейшая сепарация с одновременной коагуляцией во второй ступени.

РАЗРАБОТКА ВТОРОЙ СТУПЕНИ – АППАРАТА ДЛЯ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ

После проведения ряда модельных расчетов различных конструкций была определена оптимальная конструкция второй ступени сепарации на основе аппарата ВЗП (рисунок 3А).

Пылегазовый поток входит через патрубок закручивателя вторичного потока 5 под углом к оси аппарата и, закручиваясь, движется вниз в камере сепарации 1. Навстречу ему снизу через закручиватель 3 подается первичный запыленный газ, который закручивается в ту же сторону, что и нисходящий вторичный поток.

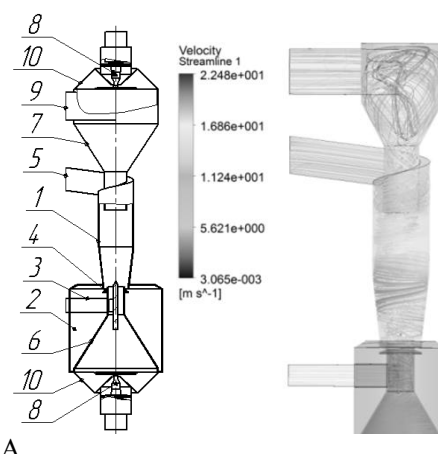
Вторичный нисходящий закрученный поток отбрасывает дисперсные частицы к внутренней стенке камеры сепарации 1. Наталкиваясь на отбойную шайбу 4, разворачивается и взаимодействует с первичным восходящим потоком, исходящим из закручивателя 3.

Частицы пыли, обладающие большей инерцией, отделяются от вторичного потока при его повороте у отбойной шайбы 4 и вылетают в бункер 2 через зазор между камерой сепарации 1 и отбойной шайбой 4.

Частицы пыли с малым удельным весом, оставшиеся во вторичном пылегазовом потоке, после поворота перемещаются из общего вихря, образованного первичным и возвращенным восходящим вторичным закрученным потоком, в периферийный нисходящий вторичный поток. Под действием центробежной силы частицы отбрасываются к внутренней стенке камеры сепарации и вылетают в бункер 2. Тем самым происходит рециркуляция наиболее мелких частиц из центрального вихря в периферийный вторичный поток.

Благодаря этому повышается эффективность пылеулавливания.

Для увеличения эффективности работы аппарата ВЗП в его конструкцию были добавлены 2 ультразвуковых излучателя 8, создающих акустическое поле с уровнем звукового давления не менее 145 дБ.



А
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.
Б

Рис. 3. Конструктивный вид (А), картина течения пылегазового потока (Б) во второй ступени центробежно-акустического пылеуловителя

С целью определения эффективности сепарации второй ступени очистки и степени укрупнения дисперсных частиц, с учетом рассчитанного уровня звукового давления внутри объема камеры сепарации и полученных экспериментальных данных [6] был проведен анализ эффективности его работы.

Результаты конечного расчета разработанной конструкции при сепарации дисперсных частиц с размером 1,6 мкм показаны на рисунке 3Б.

По результатам проведенных расчетов построен график зависимости эффективности улавливания частиц с размером 1,6 мкм в аппарате ВЗП от соотношения массового расхода газа вторичного потока и общего расхода (рисунок 4).

Из графика видно, что оптимальное соотношение расхода вторичного потока и общего расхода составило 0.64.

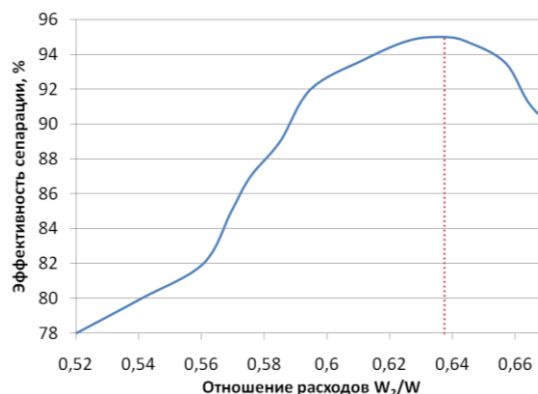


Рис. 4. Зависимость эффективности улавливания частиц с размером 1,6 мкм в аппарате ВЗП от соотношения массового расхода газа вторичного потока W_2 и общего расхода W .

В результате проведенных расчетов второй ступени очистки было установлено, что:

– время пребывания частиц в ультразвуковом поле составляет не менее 0,6 с

– аппарат ВЗП обеспечивает эффективность улавливания агломератов частиц с плотностью 200 кг/м^3 без УЗ воздействия с размером 2 мкм – 89% с размером 1,6 мкм – 85%; с размером 1 мкм – 75%; с размером 0,5 мкм – 53 %; с размером 0,2 мкм – 37 %; и с размером 0,1 мкм – 28 %;

– при наличии УЗ воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ в объеме аппарата, агломераты увеличиваются в 3 раза, при этом эффективность сепарации агломератов с размером 2 мкм – 97%; с размером 1,6 мкм – 95%; с размером 1 мкм – 92%; с размером 0,5 мкм – 85 %; с размером 0,2 мкм – 76 %; и с размером 0,1 мкм – 69 % [7].

При объединении первой и второй ступени пылеуловителя конструкция примет вид, показанный на рисунке 5.

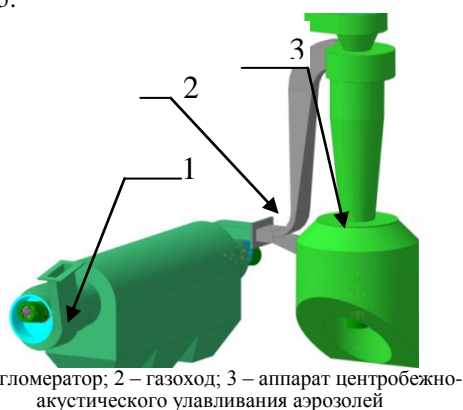


Рис. 5. Модель центробежно-акустического пылеуловителя

Согласно результатам моделирования комплекс газоочистного оборудования обеспечивает повышение эффективности сепарации частиц с начальным размером 0,2 мкм с 85 % без УЗ воздействия до не менее 95%, при наличии УЗ воздействия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ СОЗДАННОГО АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО УЛАВЛИВАНИЯ

Для подтверждения разработанной конструкции были проведены экспериментальные исследования на примере улавливания частиц SiO_2 , начальным размером 0,2 мкм. На рисунке 6 показано фото изготовленного центробежно-акустического пылеуловителя в сборе с вытяжным вентилятором.

На первом этапе экспериментов был получен график зависимости эффективности сепарации от соотношения массового расхода газа вторичного потока и общего расхода. Измерение скоростей воздушных потоков производилось анемометром Kimo LV-110.



Рис. 6. Центробежно-акустический пылеуловитель в сборе с центробежным вентилятором (агломератор не показан)

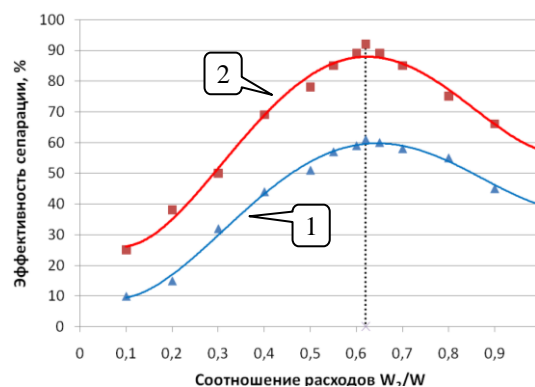
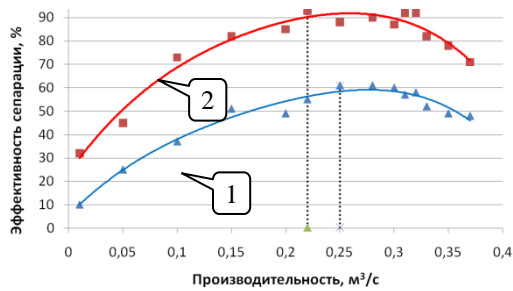


Рис. 7. Зависимость эффективности сепарации от массового расхода газа вторичного потока и общего расхода

Исследования проводились при массовой концентрации дисперсных частиц 100 г/м^3 , производительности $0,24 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимальном уровне звукового давления, равном 148 дБ. Определено оптимальное соотношение, которое составляет 0,62. Полученное соотношение отличается от расчетов, проведенных с помощью метода конечных элементов не более чем на 5%, что говорит о правильности проведенных расчетов. Также было подтверждено, что при соотношении $W_2/W = 1$ аппарат ВЗП работает как обычный противочный циклон и эффективность его небольшая. При малых значениях W_2/W аппарат работает как прямоточный циклон, эффективность сепарации которых еще меньше.

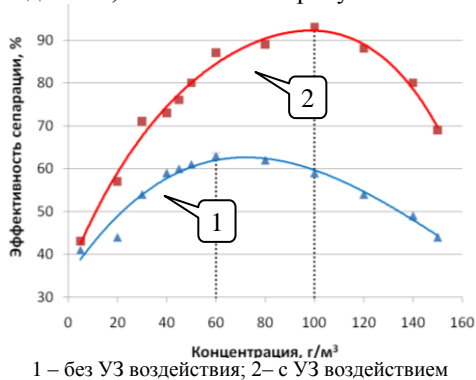
Далее, для определения оптимального расхода была полученная зависимость эффективности сепарации от производительности при концентрации 50 г/м^3 и максимальном уровне звукового давления, равном 148 дБ (рисунок 8).



1 – без УЗ воздействия; 2 – с УЗ воздействием
Рис. 8. Зависимость эффективности сепарации от производительности

При анализе полученных данных определены некоторые особенности. При малом расходе эффективность сепарации центробежно-акустическим пылеуловителем без УЗ воздействия небольшая. Это связано с малой центробежной силой, действующей на дисперсные частицы. При воздействии УЗ колебаниями с такой же производительностью эффективность сепарации возрастает вследствие высокой эффективности осаждения коагуляции. При малом расходе аппарат работает как пылесадительная камера. При воздействии УЗ колебаниями эффективность осаждения повышается с 10% до 30%. При дальнейшем увеличении расхода влияние УЗ воздействия снижается из-за малого времени пребывания частиц в УЗ поле. При расходе пылегазового потока 0,24 м³/сек получена максимальная эффективность сепарации без УЗ воздействия, которая составила 61%. При расходе пылегазового потока 0,22 м³/сек получена максимальная эффективность сепарации при наличии УЗ колебаний, которая составила 93%. Дальнейшее увеличение расхода пылегазового потока уменьшает эффективность сепарации, как без УЗ воздействия, так и с УЗ воздействием. Это связано с уменьшением времени воздействия УЗ полем и увеличением дополнительных турбулентных потоков, из-за которых происходит вторичный унос частиц.

Для определения оптимальной массовой концентрации дисперсных частиц получены экспериментальные данные, показанные на рисунке 9.



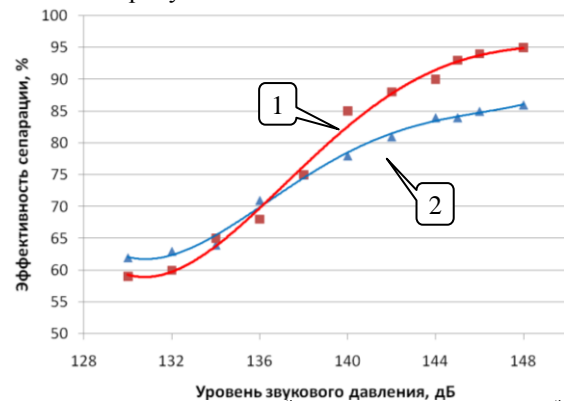
1 – без УЗ воздействия; 2 – с УЗ воздействием
Рис. 9. Зависимость эффективности сепарации массовой концентрации дисперсных частиц

Исследования проводились при оптимальной производительности (0,24 м³/сек), соотношении потоков (0,62) и максимальном уровне звукового давления (148 дБ).

Как видно из графиков при малой концентрации частиц (10 г/м³) влияние УЗ воздействия на эффективность сепарации очень мало. Это обусловлено большим расстоянием между частицами, и как следствие, малой вероятностью их соударения под действием УЗ колебаний. При концентрации 60 г/м³ наблюдается максимум эффективности сепарации без УЗ воздействия. Дальнейшее увеличение концентрации пыли, как с УЗ воздействием, так и без него, приводит к существенному снижению эффективности сепарации, что вызвано уменьшением скорости частиц, а вследствие этого и центробежной силы в связи с большой пылевой нагрузкой. Кроме того, «удар» большой массы частиц по стенкам аппарата ВЗП приводит к разрыхлению пристеночного слоя отсепарированных частиц и вторичному запылению потока.

При концентрации 100 г/м³ существует максимум эффективности сепарации с УЗ воздействием. Повышение эффективности сепарации связано с высокой эффективностью УЗ коагуляции при такой концентрации и как следствие значительным уменьшением счетной концентрации частиц.

Для определения оптимального уровня звукового давления были проведены экспериментальные исследования процесса сепарации при оптимальных значениях производительности (0,24 м³/сек) и соотношении массового расхода газа вторичного потока и общего расхода (0,62). Исследования проводились при концентрациях 60 г/м³ (соответствует оптимальному значению концентрации без УЗ воздействия) и 100 г/м³ (соответствует оптимальному значению концентрации при наличии УЗ воздействия). Зависимость эффективности сепарации от уровня звукового давления показана на рисунке 10.



1 – с концентрацией 60 г/м³; 2 – с концентрацией 100 г/м³
Рис. 10. Зависимость эффективности сепарации от уровня звукового давления

Как видно из графика, чем выше уровень звукового давления, тем выше эффективность сепарации дисперсных частиц. При уровне звукового давления

130 дБ УЗ воздействие не влияет на эффективность сепарации. Максимально высокая достигнутая интенсивность внутри объема аппарата ВЗП составила 148 дБ, которая позволяет повысить эффективность сепарации при концентрации 100 г/м^3 с 75% до 95%, а при концентрации 60 г/м^3 с 78% до 90%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

– наличие интенсифицирующего УЗ воздействия со средним уровнем звукового давления 145 дБ в объеме агломератора обеспечивает улавливание частиц с начальным размером 0,2 мкм с эффективностью 68%, при этом, за счет предварительной коагуляции аппарат позволяет укрупнить частицы в 8 раз;

– эффективность сепарации агломератов с начальным размером 1.6 мкм в аппарате ВЗП 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 0,2 мкм 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.

Экспериментально выявлено, что эффективность сепарации частиц с начальным размером 0,2 мкм в аппарате центробежно-акустического улавливания составляет не менее 60 % без УЗ колебаний и не менее 93% при наличии УЗ воздействия.

Экспериментально определены оптимальные условия УЗ воздействия и режимы работы газоочистительного оборудования для обеспечения высокой эф-

фективности улавливания дисперсных частиц из газовых сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелёв, В.Н. Акустическая коагуляция аэрозолей [Текст] / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – 2008. – №1-2. – С.66-74.
2. 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
3. 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.
4. Хмелев В.Н. Исследование акустической коагуляции аэрозоля, переносимого потоком воздуха / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Ползуновский вестник. - 2011. - № 4/1. -С. 211-216.
5. Хмелев В.Н. Создание оборудования для коагуляции высокодисперсных частиц центробежно-акустическим методом / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, В.А. Нестеров, В.Е. Бажин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. С. 282-285.
6. Хмелев В.Н. Контроль процесса ультразвуковой коагуляции дисперсных частиц нанометрового размера / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, В.А. Нестеров, М.В. Хмелев, А.Н. Галахов, Р.Н. Голых / Ползуновский вестник. -2013. -№ 2. -С. 154-158.
7. Хмелев, В.Н. Разработка конструкции аппарата центробежно-акустического улавливания аэрозолей наноразмерного диапазона [Текст] / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, 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.