

# Повышение Эффективности Центробежного Разделения Газодисперсного Потoka Наложением Ультразвуковых Колебаний

Владимир Н. Хмелев, *Senior Member*, IEEE, Андрей В. Шалунов, Виктор А. Нестеров,  
Роман Н. Голых, Роман С. Доровских, Василий Е. Бажин  
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия  
ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск, Россия

**Аннотация** – В статье показана перспективность применения ультразвуковых (УЗ) колебаний для повышения эффективности разделения газодисперсного потока на примере вихревой трубы. Разработана модель разделения газодисперсного потока, содержащего твердые частицы. Особенностью модели является учет коагуляции частиц колебаниями высокой интенсивности. Установлены характеристики потока, и параметры УЗ воздействия, обеспечивающие максимальную эффективность коагуляции высокодисперсных частиц.

**Ключевые слова** – Ультразвук, газоочистка, теоретическая модель, коагуляция, акустическое поле

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для улавливания готового продукта или пыли из отходящих газов на тепловых станциях и промышленных производствах используют различные конструкции циклонов, фильтров, пылеуловителей, осадительных камер. Несмотря на разнообразие конструкций, все указанные газоочистные устройства характеризуются низкой эффективностью, а иногда и принципиальной невозможностью улавливания высокодисперсных частиц. Из литературных источников известно, что эффективность используемых на практике установок сухого пылеулавливания, при улавливании высокодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм, очень низкая [1-2].

Многочисленные исследования и разработки отечественных и зарубежных ученых позволили установить необходимость использования внешних энергетических воздействий, способных сообщать улавливаемым частицам дополнительное движение, перпендикулярное основному, способствующему их объединению, т.е. коагуляции. При этом доказано, что на практике наиболее эффективно реализовать процесс коагуляции за счет использования колебаний звукового и УЗ диапазонов частот [3-5].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что применение энергетического воздействия акустическими колебаниями звукового диапазона частот позволяет увеличить эффективность коагуляции частиц с размерами 10 – 30 мкм и практически не обеспечивает повышения эффективности процесса объединения

дисперсных частиц размером 1 – 10 мкм. Для коагуляции таких частиц необходимы энергетические воздействия ультразвуковыми колебаниями [6]. Однако, на практике такие воздействия не реализуются из-за отсутствия газоочистного оборудования с излучателями высокоинтенсивных (не менее 130 – 150 дБ) УЗ колебаний.

Попытки создания подобного оборудования не предпринимались до настоящего времени из-за отсутствия данных об оптимальных режимах ультразвукового воздействия (частота воздействия, уровень звукового давления) на различные по параметрам газодисперсные потоки (с различными по размерам частицами, при различных скоростях потока, временах воздействия и т.п.). Невозможность определения оптимальных режимов воздействия была обусловлена неизученностью процесса ультразвуковой коагуляции в рассматриваемых условиях и отсутствием требований к создаваемому оборудованию.

В немногочисленных исследованиях прошлых лет не учитывалось изменение параметров газодисперсного потока счет ультразвуковой коагуляции. Это не позволяло в полной мере реализовать все преимущества от применения ультразвукового воздействия, но свидетельствовало о необходимости совместной оптимизации режимов движения газодисперсного потока и ультразвукового воздействия для получения максимального эффекта.

В связи с этим, задача создания специализированного газоочистного оборудования, способного обеспечить повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц из газовых сред за счет дополнительного использования энергетических воздействий ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, является актуальной и требующей решения.

Для разработки и последующей практической реализации такого оборудования необходимо определение условий течения закрученного газодисперсного потока при различных режимах ультразвукового воздействия.

## III. ТЕОРИЯ

Для описания процессов, происходящих в центробежном газоочистном оборудовании была предложена и разработана модель движения частиц, учитывающая воздействие на закрученный газодисперсный поток высокоинтенсивными УЗ колебаниями. Предложенная модель позволила

определять условия течения закрученного газодисперсного потока и режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие максимальную эффективность коагуляции частиц. В рамках предложенной модели дисперсные частицы, движущиеся в закрученном потоке, заменялись условными модельными группами частиц. При этом, процессы коагуляции частиц, вызванные наложением ультразвукового поля, рассчитывались отдельно в пределах каждой условной группы. Начальное количество дисперсных частиц в каждой группе выбиралось таким образом, чтобы на этапе завершения расчета их количество не уменьшалось ниже  $10^3$  частиц. Предварительные расчеты показали, что начальное число частиц в группе не должно быть ниже  $10^5$ . В свою очередь, для расчета движения частиц использовалась эквивалентная характеристика условной группы – средний объемно-поверхностный диаметр частиц, находящихся в группе. На рисунке 1 показано схематичное изображение принципа объединения частиц в группы. Для описания движения частиц в закрученном потоке и расчета процесса сепарации рассматривалось одномерное движение условных групп частиц, равномерно распределенных в потоке газа, движущегося со скоростью  $V_r$  в сепарационной камере. Количество групп частиц должно быть не менее  $k = 10^3$ , чтобы не происходило существенного изменения характеристик газодисперсной системы между соседними группами частиц.

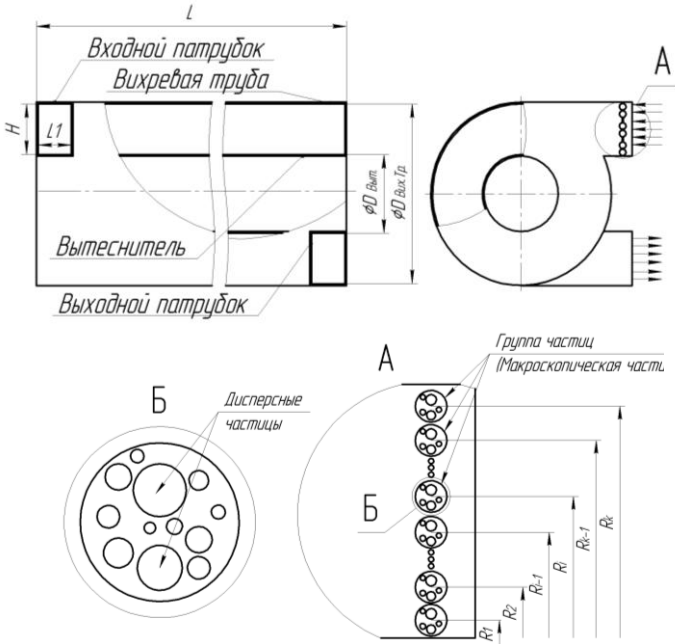


Рисунок 1 – Схематичное изображение принципа объединения частиц в условные группы

При попадании в сепарационную камеру группы частиц приобретали окружную и осевую проекции скорости, равные соответствующим проекциям скорости газового потока. Поэтому, для определения их положения в объеме вихревой камеры рассчитывалось значение радиальной скорости групп частиц, обусловленной центробежными силами:

$$\frac{dV_r}{dt} = \frac{V_r^2}{r} - \frac{3C_d V_R^2}{4d_{3,2(a)}(\rho_a, \rho_0, t, n, P, f, d_0)} \quad (1)$$

где  $C_d$  – коэффициент лобового сопротивления;  $V_r$  – скорость движения группы частиц в радиальном направлении, м/с;  $f$  – частота воздействия, Гц;  $P$  – уровень звукового давления, дБ;  $d_0$

– начальный диаметр дисперсных частиц, м;  $d_{3,2(a)}(t)$  – размер получаемых агломератов, м;  $\rho_a$  – плотность агломерата частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – концентрация частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – расстояние от центра вращения потока (оси камеры) до группы частиц, м;  $\rho_0$  – истинная плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>.

Для расчета коэффициента лобового сопротивления шарообразных частиц в диапазоне размеров 1 – 16 мкм использовалась формула Клячко [7]:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}, \quad (2)$$

где число Рейнольдса  $Re = V_r d_{3,2(a)} \rho_r / \mu_r$ ;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_r$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

Средний диаметр группы частиц вычислялся как:

$$d_{3,2(a)} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество частиц в группе;  $d_i$  – диаметры частиц входящих в группу.

С увеличением диаметров образующихся агломератов начинают действовать межмолекулярные силы, которые способствуют образованию более рыхлой структуры. Поэтому плотность агломерата частиц вычислялась как:

$$\rho_a = \rho_0 \sqrt{\frac{d_0}{d_{3,2(a)}(t)}}, \quad (4)$$

Данное выражение позволяет учесть изменение плотности, образующихся при объединении частиц под действием УЗ-колебаний, агломератов в зависимости от их размера. Расчеты проведены при начальной плотности 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Расчет процесса ультразвуковой коагуляции проводился в пределах отдельных условных групп частиц на основании уравнения Смолуховского [8], которое было дополнено слагаемыми, учитывающими изменение концентрации частиц за счет взаимного перемещения групп частиц и изменения расстояния между группами:

$$\frac{\partial n_k(t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k(t) \sum_{i=1}^M \beta_{i,k} n_i(t) - n_k(t) \frac{1}{r} \frac{\partial^2 r}{\partial r_0 \partial t} - \frac{n_k(t)}{r} \frac{\partial r}{\partial t} \quad (5)$$

где  $k$  – натуральное число;  $\beta_{i,k}$  – ядро коагуляции, характеризующее интенсивность столкновения  $i$ -мер и  $k$ -мер, м<sup>3</sup>/с;  $n_k$  – концентрация  $k$ -мер, м<sup>-3</sup>;  $M$  – количество мер;  $r_0$  – начальное расстояние группы от центра оси, м.

Результирующее ядро коагуляции  $\beta_{i,k}$  можно представить в виде суммы двух компонент, характеризующих сближение частиц за счет механизма ортокинетического взаимодействия (коагуляция происходит за счет разности скоростей различных по массе частиц) и механизма гидродинамического взаимодействия.

$$\beta_{i,k} = \beta_{oi,k} + \beta_{hi,k}, \quad (6)$$

Ортокинетическая составляющая определялась с помощью выражения:

$$\beta_{oi,j} = 2 \left( \frac{d_i}{2} + \frac{d_j}{2} \right)^2 U_0 H_{i,j}, \quad (7)$$

где  $d_i, d_j$  – диаметр  $i$ -меры и  $j$ -меры соответственно, м;  $U_0$  – амплитуда колебательной скорости газовой среды, м/с;  $H_{i,j} = |H_i - H_j|$  – модуль разности коэффициентов увлечения  $i$ - и  $j$ -меры, характеризующий амплитуду колебательной скорости относительного смещения  $i$ - и  $j$ -меры.

Для определения гидродинамической компоненты ядра коагуляции использовалось выражение, описанное в работах авторов С. Sheng, X. Shen [4,9]:

$$\beta_{hi,j} = \frac{(d_i + d_j)^2}{6\mu_\Gamma} \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j} \right) \int_0^\pi h(f_{21}) f_{21} \sin \theta d\theta, \quad (8)$$

где  $\theta$  – угол между волновым вектором акустической волны и линией центров частиц,  $f_{21}$  – сила взаимодействия частиц,  $h(f_{21})$  – функция Хевисайда.

В результате для каждой группы частиц была получена система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_k(t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k(t) \sum_{i=1}^M \beta_{i,k} n_i(t) - n_k(t) \frac{1}{\partial r} \frac{\partial V_r}{\partial r_0} - \frac{n_k V_r}{r} \\ \frac{dV_r}{dt} = \frac{V_r^2}{r} - \frac{3C_d V_R^2}{4d_{3,2(a)} (\rho_a \cdot \rho_0 \cdot t, n, P, f, d_0)} \\ \frac{dr}{dt} = V_r \\ d_{3,2(a)} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \end{cases} \quad (9)$$

Полученная система уравнений позволяет рассчитать траекторию движения условных групп частиц в сепарационной камере с учетом коагуляции дисперсных частиц внутри группы под действием ультразвуковых колебаний. Расчеты были проведены для характеристик газодисперсной среды и параметров процесса, оказывающих основное влияние на эффективность сепарации частиц: начальный размер частиц, уровень звукового давления, тангенциальная скорость потока. При этом принимались следующие начальные условия реализации процесса: тангенциальная скорость газового потока 20 м/с, частота воздействия 22 кГц, диаметре вихревой трубы 340 мм, уровне звукового давления 145 дБ и начальной массовой концентрации частиц 50 г/м<sup>3</sup>. Группа частиц, достигающая стенки сепарационной камеры, движется вдоль нее, однако в процессе коагуляции не участвует. Обрыв кривых на графиках означает, что все группы частиц достигли стенки камеры.

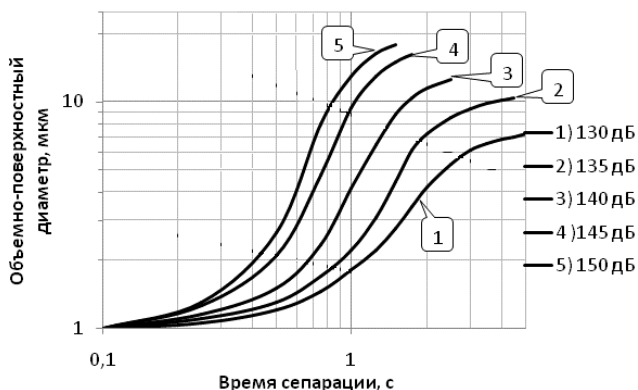


Рисунок 2 – Зависимость эквивалентного диаметра группы частиц от времени УЗ воздействия при разных уровнях звукового давления

Было установлено (рисунок 2), что эффективность коагуляции прямо пропорциональна уровню звукового давления. При этом, увеличение уровня звукового давления от 135 дБ до 145 дБ позволяет до 2,8 раз уменьшить время полной сепарации за счет 18-кратного укрупнения частиц.

Однако, увеличение уровня звукового давления во всем объеме газоочистного оборудования выше 145...150 дБ связано с трудностями создания таких излучателей и опасностью воздействия таких УЗ колебаний на человека

[10-15]. В связи с этим возникает необходимость в оптимизации параметров газодисперсного потока для улучшения условий для сближения и коагуляции дисперсных частиц. Известно, что одним из основных факторов, влияющих на эффективность коагуляции, является концентрация дисперсных частиц в единице объема газовой среды [16-20]. Путем изменения скорости потока можно обеспечить предварительное сближение частиц и локальное повышение их концентрации за счет центробежных сил. Разработанная модель позволила исследовать влияние тангенциальной скорости потока на эффективность коагуляции частиц. Полученные зависимости эквивалентного диаметра частиц от времени УЗ воздействия при разных тангенциальных скоростях газового потока представлены на рисунке 3)

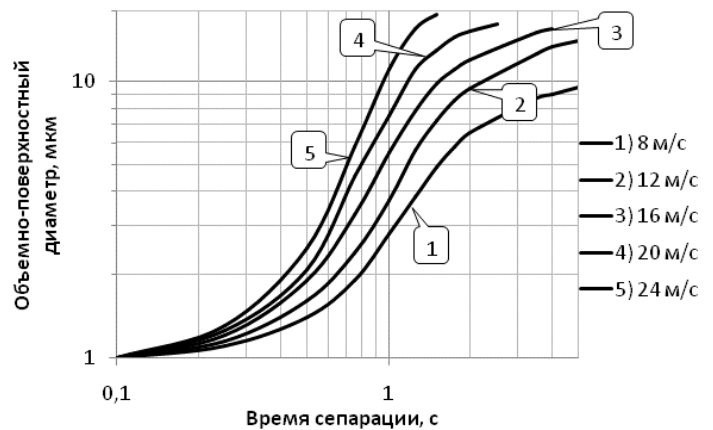
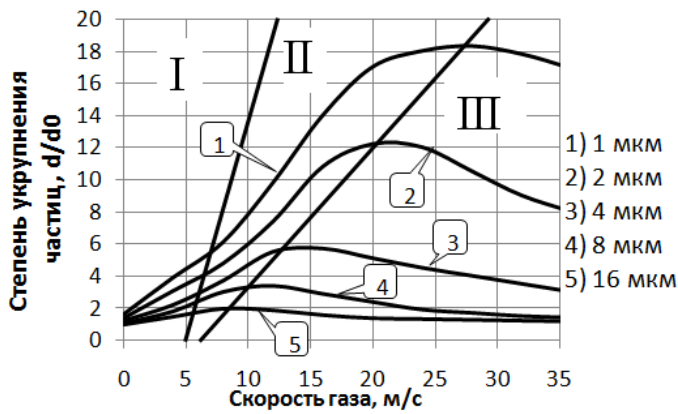


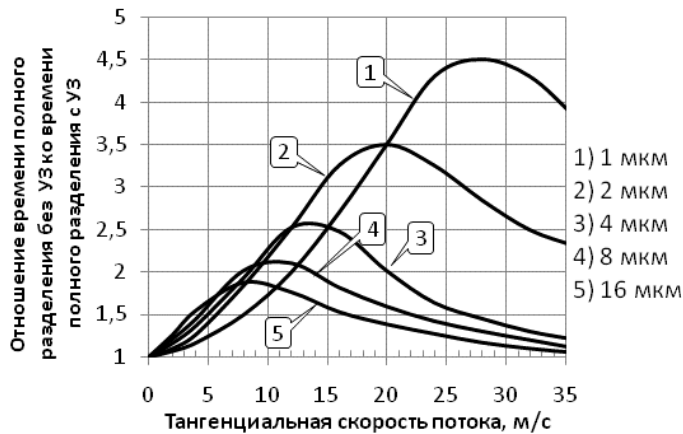
Рисунок 3 – Зависимость эквивалентного диаметра группы частиц от времени УЗ воздействия при разных тангенциальных скоростях газа

Согласно зависимостям, представленным на рисунке 3, увеличение скорости с 8 м/с до 24 м/с обеспечивает увеличение диаметра частиц в 2 раза и сокращение времени сепарации в 12 раз. Для сравнения, аналогичное увеличение скорости потока без наложения УЗ колебаний обеспечивает сокращение времени сепарации всего в 4,5 раза. Причина заключается в том, что укрупненные за счет УЗ воздействия группы частиц смещаются к стенке сепарационной камеры с большей скоростью. Это приводит к увеличению концентрации дисперсных частиц (т.е. уменьшению расстояния между группами частиц), что, в свою очередь, повышает эффективность коагуляции.

Дальнейшие исследования позволили установить, что существует оптимальная скорость, при которой степень укрупнения дисперсных частиц и сокращение времени на разделение газодисперсного потока будут максимальными. Расчеты были проведены при уровне звукового давления 145 дБ и частоте УЗ колебаний 22 кГц. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при малых скоростях газа (на рисунке 4, а соответствует зоне I) разделение потока будет несущественным, и на удалении от оси вращения закрученного потока не наблюдается локальных повышений концентрации частиц.



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимости степени укрупнения частиц от скорости газа с УЗ (а) и зависимости отношения времени сепарации без УЗ ко времени сепарации с УЗ от скорости газа (б)

Соответственно, повышения эффективности коагуляции и уменьшения времени сепарации происходить не будет. В диапазоне скоростей, значения которых соответствуют зоне II, происходит увеличение эффективности разделения газодисперсного потока, происходит локальное повышение концентрации, в результате чего эффективность коагуляции возрастает. Максимальная эффективность коагуляции (рисунок 4, а) и сокращение времени полного разделения достигается (рисунок 4, б) при оптимальных тангенциальных скоростях. Скорости потока выше оптимальных (зона III), приводят к быстрому разделению газодисперсного потока за счет центробежной силы и уменьшению времени достижения частицами стенки вихревой трубы и, следовательно, сокращению времени УЗ-воздействия. Поскольку значение оптимальной тангенциальной скорости потока зависит от диаметра сепарационной камеры, то для проведения дальнейших расчетов был выбран параметр, свободный от такой зависимости – центростремительное ускорение. Полученная зависимость оптимального ускорения от размера частиц показана на рисунке 5.

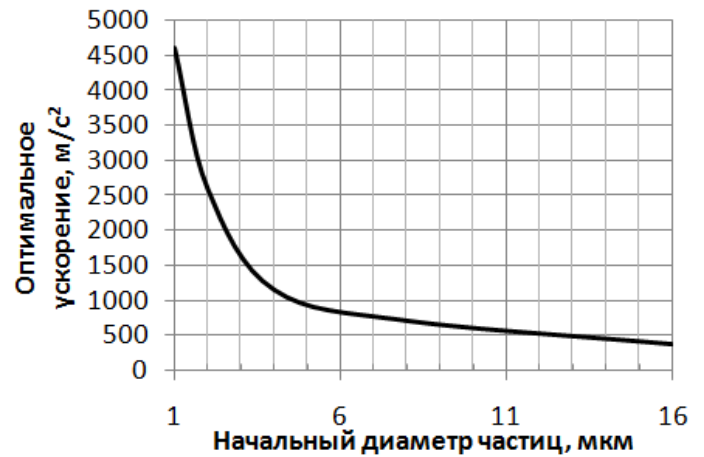


Рисунок 5 – Зависимость оптимального ускорения от начального диаметра частиц

На рисунке 6 приведены зависимости степени укрупнения частиц от времени сепарации при определенных оптимальных центростремительных ускорениях. Эти зависимости позволяют оценить вклад, вносимый УЗ колебаниями на процесс сепарации частиц.

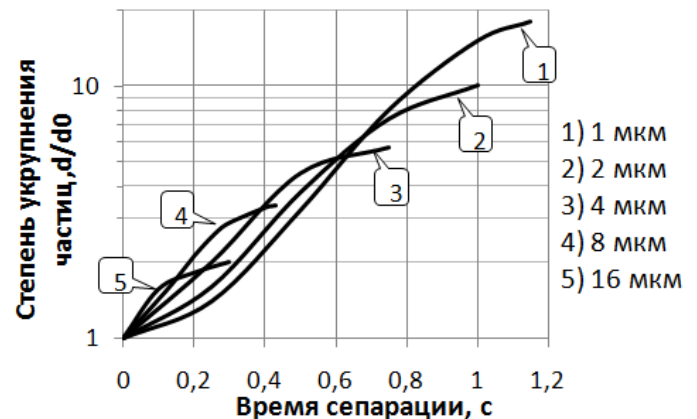


Рисунок 6 – Зависимости степени укрупнения частиц от времени сепарации при оптимальных ускорениях

В результате проведенных исследований установлено, что для обеспечения максимальной эффективности коагуляции требуется установление определенной тангенциальной скорости газового потока, которая определяется начальными размерами дисперсных частиц. При этом, время пребывания частиц в УЗ поле, при котором частицы с диаметром 1 мкм увеличиваются до 20 мкм (с ускорением  $4500 \text{ м/с}^2$ ), составляет более 1,2 секунды. Размер частиц (20 мкм) взят из условия улавливания стандартным инерционным газоочистным оборудованием (например, циклоном ЦН-15) с эффективностью не менее 95% [1, 2].

Проведенные исследования показали, что с точки зрения эффективности озвучивания объема, наиболее целесообразной конструкцией агломератора является вихревая труба с тангенциальными входным и выходным патрубками [21]. Однако эффективность отделения дисперсных частиц от газодисперсного потока не велика, так как он не снабжен дополнительными улавливающими элементами. При этом, агломератор нельзя использовать как устройство высокоэффективной очистки. Таким образом, для эффективного улавливания необходима вторая ступень очистки агломератов частиц, образующихся в вихревой трубе за счет центробежно-акустического воздействия.

Однако эффективность озвучивания объема циклонных аппаратов не велика. Это связано с наличием улавливающих элементов, перегораживающих путь распространения УЗ колебаний, при этом эффективность коагуляции в таких аппаратах будет не велика.

Таким образом, исследования позволили установить, что невозможно обеспечить требуемое время пребывания частиц только в одной ступени очистки с одновременным обеспечением высокой эффективности сепарации. Для получения необходимой степени укрупнения частиц газоочистное оборудование должно содержать как минимум две ступени очистки. В первой ступени должно осуществляться УЗ воздействие на закрученный газовый поток для быстрой коагуляции дисперсных частиц за счет их предварительного разделения. Во второй – должна осуществляться высокоэффективная сепарация уже скоагулированных частиц.

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических исследований были получены следующие результаты:

1. Предложена и разработана математическая модель, учитывающая изменение траектории движения дисперсных частиц в закрученном потоке за счет увеличения их диаметра под действием УЗ колебаний высокой интенсивности и позволившая выявить условия течения газодисперсного потока (центростремительное ускорение) и режимы УЗ воздействия (уровень звукового давления, время воздействия), обеспечивающие максимальную эффективность коагуляции при различных начальных диаметрах и концентрациях частиц.

2. Установлено, что для получения максимальной эффективности УЗ коагуляции дисперсных частиц для повышения эффективности улавливания инерционных газоочистным оборудованием необходима совокупная оптимизация режимов движения газодисперсного потока и ультразвукового воздействия.

3. Определена зависимость оптимального ускорения, действующего на частицы, от начального диаметра дисперсных частиц, при которых обеспечивается максимальная эффективность коагуляции.

4. Установлены зависимости степени укрупнения агломератов при коагуляции дисперсных частиц от времени сепарации при оптимальных ускорениях.

5. Показано, что УЗ воздействие с уровнем звукового давления 145 дБ при оптимальном ускорении 4600 м/с<sup>2</sup> обеспечивает 18-кратное увеличение агломератов частиц с начальным диаметром 1 мкм за 1,2 секунды.

6. Установлено, что для обеспечения высокой эффективности улавливания дисперсных частиц газоочистное оборудование должно содержать как минимум две ступени очистки. Первая ступень – агломератор для предварительной обработки газового потока. Вторая ступень должна обеспечивать высокую эффективность сепарации уже скоагулированных частиц.

Полученные результаты исследований могут служить основой для определения геометрических размеров первой ступени предварительной обработки – агломератора и технических требований к ультразвуковым излучателям для коагуляции высокодисперсных частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химических технологий [Текст]/ А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784с.
- [2] 5. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
- [3] Khmelev V.N. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh // 15<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2014. – p. 233-239.
- [4] Khmelev V.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, K.V. Shalunova // 11<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2010. – p. 328-333.
- [5] Khmelev V.N. Revealing of optimum modes of ultrasonic coagulation of submicron particles and determining of the shape of the aggregates by mathematical modeling / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R. N. Golykh, K. V. Shalunova, A. N. Galakhov, V.A. Nesterov // 15<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2014. – p. 208-212.
- [6] Khmelev V.N. The Acoustical Coagulation of Aerosols / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K. V. Shalunova // 9<sup>th</sup> International workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM'2008: Workshop proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – p. 289-294.
- [7] Старченко, А.В. Математическая модель неизотермического турбулентного течения газовзвеси в трубе [Текст]/ А.В. Старченко, А.М. Бубенчиков, Е.С. Бурлуцкий // Теплофизика и аэромеханика. – 1999. – Т. 6. – № 1. – С. 59–70.
- [8] Галкин, В.А. Уравнение Смолуховского [Текст] / В.А. Галкин. – М.: Физико-математическая литература, 2001. – 336 с.
- [9] Khmelev V.N. Study of possibility of ultrasonic coagulation in air flow / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova, A.A. Antonnicova // 13<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2012: Novosibirsk, NSTU, 2012. – p. 183-187.
- [10] Lebedev A.N. Ultrasonic oscillating system for radiators of gas media / A.N. Lebedev, A.V. Shalunov, S.S. Khmelev, N.V. Kuchin, A.V. Shalunova // 9<sup>th</sup> International workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM'2008: Workshop proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – p. 267-271.
- [11] Khmelev V.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // 16<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2015: Conference proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – p. 224-228.
- [12] Kidanov V.A. Method of analysis of ultrasonic radiators on the base of flexural vibrations of disks with step-variable form // V.A. Kidanov, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev // 11<sup>th</sup> International conference and seminar on micro / nanotechnologies and electron devices, EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – p. 337-340.
- [13] Khmelev V.N. Multifrequency ultrasonic transducer with stepped-plate disk / V.N. Khmelev, A.N. Lebedev, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov, A.N. Galahov, K.V. Shalunova // 10<sup>th</sup> International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – p. 250-253.
- [14] Khmelev V.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A. N. Galahov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh // 15<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – p. 187-193.
- [15] Galakhov A.N. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc / A. N. Galakhov, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova // 15<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – p. 194-198.
- [16] Khmelev V.N. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // 16<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2015: Conference proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – p. 213-217.
- [17] Khmelev V.N. The Development of the Agglomerator for Efficiency Increase of the Separation of Nanoscale Particles // V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, K.V. Shalunova // 14<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – p. 171-176.
- [18] Khmelev V.N. Development of the Apparatus for Centrifugal Acoustic Collection of Nanoscale Aerosols / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, K.V.

- Shalunova // 14<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – p. 161-165.
- [19] Khmelev V.N. The Control of the Ultrasonic Coagulation of Dispersed Nanoscale Particles / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, M.V. Khmelev // 14<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. – p. 166-170.
- [20] Khmelev V.N. Ultrasonic Coagulation on the Basis of Piezoelectric Vibrating System with Focusing Radiator in the form of Step-Variable Plate // V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, S.N. Tsyganok, A.N. Lebedev // 9<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2010: Novosibirsk, NSTU, 2010. – p. 376-379.
- [21] Khmelev V.N. Development and Investigation of the Ultrasonic Coagulation Camera / V.N. Khmelev A.V. Shalunov, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. - P.274-276.