

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, П.П. Тертишников

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск

В статье рассматриваются акустические течения, формирующиеся в тонком зазоре между плоским дисковым излучателем и отражателем. Показано, что градиент звукового давления, возникающий за счет наличия отражателя и аэрозоля приводит к возникновению акустических потоков вихревого типа. По результатам моделирования установлено, что формирование акустических вихрей обеспечивает повышение концентрации (более 4-х раз) дисперсных частиц в непосредственной близости от поверхности отражателя, что способствует увеличению вероятности их столкновения. Установлено, что для газового промежутка 16 мм за 6 секунд суммарная масса аэрозольных частиц уменьшается более чем в 3 раза.

Ключевые слова: газоочистка, ультразвук, коагуляция, газодисперсная система, аэрозоль.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в атмосферу поступают миллионы тонн загрязняющих веществ в высокодисперсном состоянии. На сегодняшний день для очистки промышленных выбросов от дисперсных частиц разработаны и применяются на практике различные аппараты, отличающиеся по конструктивному исполнению и основанные на различных физических механизмах улавливания взвешенных частиц. Существующие аппараты, основанные на сухих или мокрых способах очистки газов, обеспечивают высокую эффективность (до 95–99%) улавливания дисперсных частиц с размером более 5 мкм. Однако их эффективность значительно уменьшается (падает практически до 0%) при улавливании высокодисперсных частиц с размерами менее 2,5 мкм. В стране не существует методик и оборудования для контроля и улавливания таких высокодисперсных частиц [1-4]

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Формирование вихревых потоков, в первую очередь, определяется акустическим полем, возникающим в среде. Механизм формирования вихря состоит в переносе импульса волны при возникновении переходного слоя скольжения вблизи границы раздела сред (поверхности излучателя или стенки технологического объема). Для выделения величин, которыми характеризуются вихревые потоки, было выполнено расщепление уравнений Навье-Стокса по физическим процессам:

1. Колебания физических параметров среды (плотность-скорость), которые описываются уравнением Гельмгольца, получаемого после подстановки производной дивергенции скорости по

времени из уравнения неразрывности в уравнение сохранения импульса:

$$(k + ik_{**})^2 \varphi + \Delta \varphi = 0; \quad (3.1)$$

$$\rho_a = \frac{1}{c^2} \operatorname{Re} \left(\left[\left(2\mu + \frac{\xi}{3} \right) \Delta \varphi + i \omega \rho_0 \varphi \right] e^{-i\omega t} \right) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{v}_a = \operatorname{Re} \left(e^{-i\omega t} \nabla \varphi \right) \quad (3.3)$$

где k – волновое число, м^{-1} ; k_{**} – коэффициент поглощения, м^{-1} .

Уравнение Гельмгольца дополняется граничными условиями на поверхности излучателя:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = A_n; \quad (3.4)$$

и на неподвижных стенках озвучиваемого объема газовой фазы

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (3.5)$$

Граничные условия (3.4, 3.5) справедливы ввиду малости толщины пограничного слоя скольжения по сравнению с длиной ультразвуковой волны и характерными размерами расчетной области.

2. Акустические течения, вызванные действием постоянной силы из-за диссипации энергии, приводящей к стационарным движениям газа. Уравнения, описывающие акустические течения, представляют собой уравнения Навье-Стокса с эквивалентной объемной силой \mathbf{F} , определяемой

параметрами акустического поля ρ_a и \mathbf{v}_a :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0; \quad (3.6)$$

$$\rho_0 (\mathbf{u}, \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}. \quad (3.7)$$

Эквивалентная объёмная сила определяется согласно ранее приведённому выражению (2.2). Поскольку акустические течения, как было отмечено в ранее проведённых исследованиях [5–7], имеют вихревой характер, то исполнителями проекта было получено выражение для вихря силы \mathbf{F} в зависимости от распределения комплексных амплитуд потенциала скорости газа:

$$\operatorname{rot} \mathbf{F} = -2kk_{**} (\nabla(\operatorname{Im} \varphi) \times \nabla(\operatorname{Re} \varphi)) + \frac{\mu \omega}{2c^2 \rho_0} \Delta (\nabla(\operatorname{Im} \varphi) \times \nabla(\operatorname{Re} \varphi)) \quad (3.8)$$

Из представленного выражения следует, что возникновение вихревых акустических течений возможно только при ненулевых значениях коэффициента поглощения колебаний и вязкости газа, что согласуется с ранее проведёнными исследованиями [5–7].

На основании полученного выражения для вихря силы определяется пространственное распределение скорости течения жидкости согласно уравнениям (3.6, 3.7).

Полученные распределения уровня звукового давления, вычисляемые на основании комплексных амплитуд потенциала скорости движения жидкости

$$L_{SP} = 20 \text{ дБ} \cdot \log \frac{\omega \rho_0 |\varphi|}{\sqrt{2} \cdot 20 \text{ мкПа}} \quad \text{представлены на (рис. 1).}$$

Излучатель расположен сверху, диаметр излучателя – 320 мм, частота колебаний – 22 кГц, озвучиваемый газ – воздух при нормальных условиях, знаками «+» обозначены зоны, в которых давление колеблется в положительной фазе, а «-» – в отрицательной фазе.

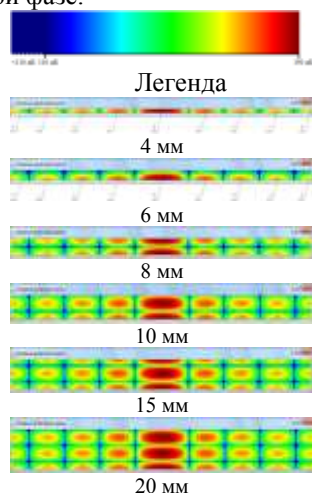


Рис. 1. Распределения звукового давления при различных расстояниях между излучателем и отражающей поверхностью

На основании рассчитанных распределений звукового давления были построены поля скоростей вихрей при различных толщинах слоя (рисунок 4.2).

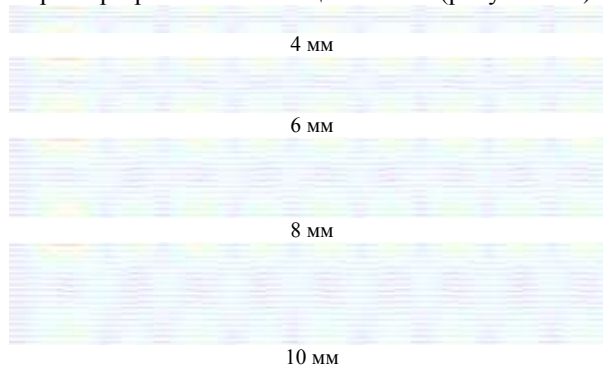
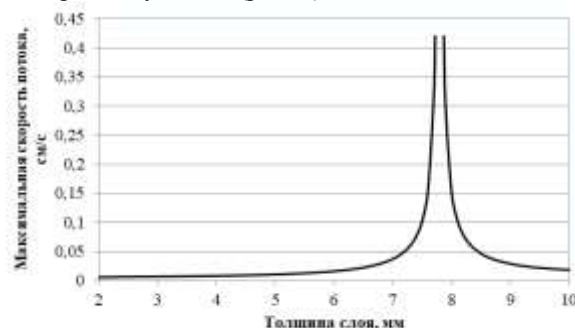


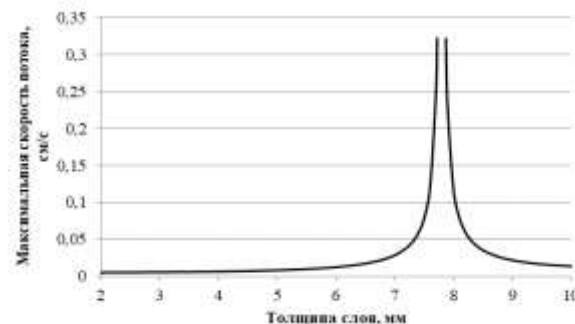
Рис. 2. Поля скоростей акустических течений при различных расстояниях между излучателем и отражающей поверхностью

Установлено, что линии тока меняют своё направление на противоположное (наблюдается закручивание линий тока) в точках локального максимума звукового давления. В точках локального минимума звукового давления (где градиент звукового давления наибольшей) линии тока направления не меняют, но при этом скорость движения газа достигает максимума.

На основании построенных полей скоростей приведены зависимости максимума скорости вихря (по объёму слоя) от толщины слоя при различных диаметрах излучателя (рис. 3).



а) 250 мм



б) 320 мм

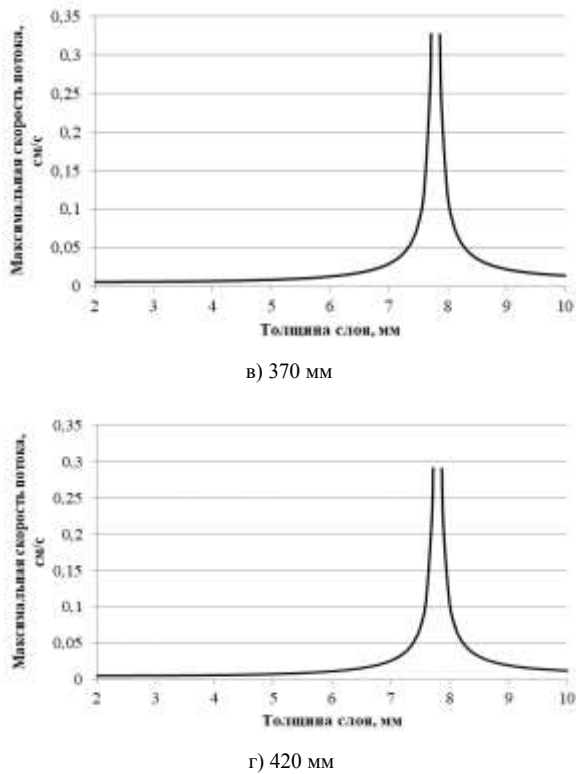


Рис. 3. Зависимости максимальной скорости акустических течений от толщины слоя при различных диаметрах дискового излучателя

Из представленных зависимостей видно, что скорость акустических течений не зависит от диаметра дискового излучателя (поскольку диск имеет регулярную структуру с чередующимися участками с противоположной фазой колебаний), и следовательно этот параметр из дальнейших расчетов можно исключить.

Разработанная модель формирования акустических течений под действием колебаний послужила основой для создания модели движения и коагуляции частиц в тонком газовом промежутке.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ВИХРЕВЫХ ПОТОКАХ

Предложенная модель позволяет рассчитать распределение концентрации аэрозольных частиц в объеме в различные моменты времени при заданном распределении амплитуд колебаний излучателя, частоте колебаний, заданных размерах объема с учётом условий прилипания частиц к отражателю и боковым границам объема и упругого отражения частиц от дискового излучателя колебаний.

Предложенная модель впервые учитывает стационарные течения, вызванные эквивалентными объёмными силами, связанными с диссипацией энергии ультразвуковых колебаний.

Разработанный численный метод анализа модели впервые позволяет свести задачу расчёта

пространственно неоднородной эволюции и коагуляции частиц в трёхмерном осесимметричном слое к двумерной задаче. Это позволяет на порядок повысить производительность расчёта.

Модель основана на подходе Лагранжа, который заключается в отслеживании поведения индивидуальных частиц, имеющих одинаковые размеры, массы, одинаковые скорости и близкие пространственные положения.

Поскольку количество частиц размером до 10 мкм в объёме диаметром 320 мм и высотой от 10 мм составляет более 150 млн. даже при запылённости 10 г/м³, и при этом несколько частиц имеют близкие размеры, скорости и пространственные положения, целесообразно для ускорения процесса расчёта поведения частиц объединить их в группы.

Каждая группа с номером i содержит несколько частиц и характеризуется следующими параметрами:

- диаметр частиц d_i . Все частицы, входящие в i -ю группу имеют одинаковый диаметр, который равен d_i ;
- вектор скорости частиц \mathbf{u}_i . Все частицы, входящие в i -ю группу, имеют одинаковую скорость, которая равна \mathbf{u}_i ;
- количество реальных частиц N_i – количество частиц, входящих в группу;
- вектор координат частиц \mathbf{r}_i . Все частицы, входящие в i -ю группу, имеют близкие пространственные положения, находящиеся в ε -окрестности точки с вектором координат \mathbf{r}_i .

Здесь и в дальнейшем понятие группы эквивалентно понятию виртуальной частицы – частицы с характеристиками (диаметр, вектор скорости, вектор координаты), идентичными характеристикам соответствующей ей группе.

Движение виртуальной частицы описывается следующим обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt}(t) = 3\pi\mu d \left(\mathbf{v}_f \left(\mathbf{r}_{p0} + \int_0^t \mathbf{v}_p(t) dt, t \right) - \mathbf{v}_p \right) \quad (4)$$

где \mathbf{v}_p – скорость движения частицы, м/с; \mathbf{v}_f – скорость движения газа (включающая стационарную

составляющую \mathbf{V}_{vort} , обусловленную вихревыми

течениями, и колебательную составляющую \mathbf{V}_{osc} , обусловленную переменным звуковым давлением

$\mathbf{v}_f = \mathbf{V}_{osc} + \mathbf{V}_{vort}$, м/с; \mathbf{r}_{p0} – начальное пространственное положение виртуальной частицы, м.

При этом при расчёте эволюции облака виртуальных частиц учитываются процессы коагуляции частиц между собой, налипание частиц на границу слоя, отражение частиц от дискового излучателя.

Для повышения производительности расчётов на порядок, вычисления эволюции облака виртуальных частиц проводятся в одной из плоскостей продольного сечения цилиндрического слоя. Рассмотрение одной из плоскостей сечения вместо рассмотрения всего объёма слоя допустимо ввиду осесимметричности распределения колебаний дискового излучателя, как было отмечено в предыдущем разделе.

Кроме того, как показали проведённые оценки, основное влияние на постоянное перемещение частиц оказывают стационарные вихревые акустические течения, расчёт которых был произведён в предыдущем разделе. Это позволяет для расчёта пространственных положений частиц принять

$\mathbf{v}_f \left(\mathbf{r}_{p0} + \int_0^t \mathbf{v}_p(t) dt, t \right)$ равной скорости вихревого течения в данной точке.

В качестве начальных данных (характеристик аэрозоля в начальный момент времени) задаются:

- массовая концентрация частиц в объёме ρ (кг/м³);
- начальный диаметр частиц d_0 (м) (предполагается, что в начальный момент времени аэрозоль является монодисперсным);
- плотность вещества частиц ρ_p (кг/м³) (предполагается, что в начальный момент времени концентрация аэрозольных частиц распределена равномерно по объёму слоя).

Таким образом, расчёт эволюции аэрозоля в слое состоит из следующих этапов:

1. Генерация начального набора равномерно распределённых по объёму виртуальных частиц со следующими характеристиками:

- скорость каждой виртуальной частицы равна нулю;
- диаметр всех виртуальных частиц одинаков и равен d_0 ;

– количество виртуальных частиц в плоскости составляет $C=1280000$ (количество виртуальных частиц по оси R $C_R=4800$, по оси Z $C_Z=800$);

– начальное положение каждой виртуальной частицы определяется согласно выражениям (номер виртуальной частицы $i = 1 + C_R i_Z + i_R$, где $i_R=0 \dots C_R-1$; $i_Z=0 \dots C_Z-1$):

$$r = \frac{R}{C_R} \left(\frac{1}{2} + i_R \right);$$

$$z = \frac{H}{C_Z} \left(\frac{1}{2} + i_z \right);$$

где R – радиус слоя, м; H – высота слоя м.

– количество реальных частиц, соответствующих одной виртуальной частице номером

$i = 1 + C_R i_Z + i_R$ определяется согласно следующему выражению:

$$N_i = \frac{6\rho R^2 H}{\pi d_0^3 C_R^2 C_Z} (2i_R + 1). \quad (5)$$

На этом же шаге задаётся значение времени $t=0$.

2. Цикл расчёта смещений частиц на следующем временном шаге $t+\Delta t$. Для каждой отдельной виртуальной частицы, по которым выполняется цикл, рассчитываются:

– прогнозируемая скорость $\mathbf{v}_p(t + \Delta t)$ и пространственное положение частицы $\mathbf{r}_p(t + \Delta t)$ на временном шаге $t + \Delta t$.

– если прогнозируемое пространственное положение частицы $\mathbf{r}_p(t + \Delta t)$ оказывается за пределами слоя, то определяется вид границы, которую пересекает отрезок $[\mathbf{r}_p(t); \mathbf{r}_p(t + \Delta t)]$. Если пересекаемая граница совпадает с осью симметрии слоя или поверхностью излучателя ($z=0$), то пространственное положение частицы не меняется, а скорость частицы меняет нормальную компоненту в соответствии с выражением (2) (абсолютно упругое отражение):

$$\mathbf{u}_p(t + \Delta t) = \mathbf{u}_p(t) - 2\mathbf{n}(\mathbf{u}_p(t), \mathbf{n}) \quad (6)$$

Если пересекаемая граница совпадает с боковой стенкой или дном слоя, то данная виртуальная частица на временном шаге $t+\Delta t$ исключается из расчёта (условие прилипания).

– если прогнозируемое пространственное положение частицы $\mathbf{r}_p(t + \Delta t)$ оказывается внутри слоя, то новое пространственное положение частицы на следующем временном шаге принимается равным прогнозируемому.

3. Модификация характеристик существующих и генерация новых виртуальных частиц за счёт коагуляции.

Вклад коагуляции в ансамбль виртуальных частиц и его характеристики описывается вероятностью моделью, представленной в следующем подразделе.

Согласно вероятностной модели область движения расчетной частицы представляется (рис.4) в виде цилиндра с высотой, равной расстоянию, которое проходит расчетная частица за один шаг по времени [7–13]. Столкновение расчетной и виртуальной частиц происходит в том случае, если центр виртуальной частицы окажется в цилиндрической области (область столкновения) с сечением в виде круга диаметром $d_{pr}+d_{pf}$ (сечение столкновения).

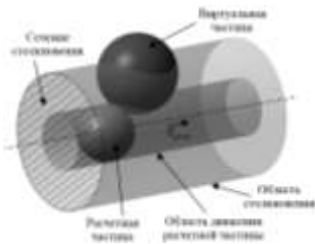


Рис. 4. Механизм столкновения двух частиц в расчетной ячейке

Расчет столкновения частиц ведется в локальной системе координат, в которой виртуальная частица неподвижна (компоненты скорости виртуальной частицы равны нулю).

Если $P_{col}(\Delta t) < \psi$, столкновение частиц не происходит, и составляющие скорости расчетной частицы остаются неизменными.

В случае столкновения при $P_{col}(\Delta t) > \psi$ пересчитываются характеристики расчетной частицы (диаметр и скорость) в глобальной (исходной) системе координат.

В результате столкновения двух частиц образуется новая расчетная частица с эквивалентным диаметром

$$d_{pr} = \sqrt[3]{d_{pr}^3 + d_{pf}^3} \quad (7)$$

Скорость расчетной частицы после столкновения определяется на основе закона сохранения импульса:

$$|\bar{v}_{pr}| = |\bar{v}_{pr} - \bar{v}_{pf}| \cdot \frac{m_{pr}}{m_{pr} + m_{pf}}, \quad (8)$$

где m_{pr} , m_{pf} – масса расчетной и виртуальной частиц до столкновения, кг.

$$N_{col} = N_p \frac{\pi}{4} (d_{pr} + d_{pf})^2 |\bar{v}_{col}| \cdot n_p \cdot \Delta t.$$

Число реальных частиц, находящихся в группе, после столкновения пересчитывается с целью поддержания общей массы частиц в группе:

$$N_p = N_p \frac{d_{pr}^3}{d_{pr}^3 + d_{pf}^3}.$$

Дальнейшая траектория движения новой виртуальной частицы рассчитывается с использованием дифференциального уравнения (1).

Таким образом, создана модель и метод расчёта движения и коагуляции частиц в тонком слое.

На основе предложенной модели рассчитаны распределения концентраций частиц в различные моменты времени при колебаниях дискового излучателя. Результаты расчётов приведены в следующем подразделе.

На (рис.5) приведены распределения массовых концентраций аэрозольных частиц (начальная массовая концентрация была одинаковой по всему объёму и составляла 100 г/м^3) по объёму в различные моменты времени. Уровень звукового давления вблизи центра дискового излучателя – 150 дБ и частота колебаний – 22 кГц .

Диаметр излучателя – 320 мм , толщина слоя – 16 мм .

Представлены распределения в одной полуплоскости продольного сечения слоя (ось симметрии расположена слева),

Дисковый излучатель расположен сверху ($z=0$)

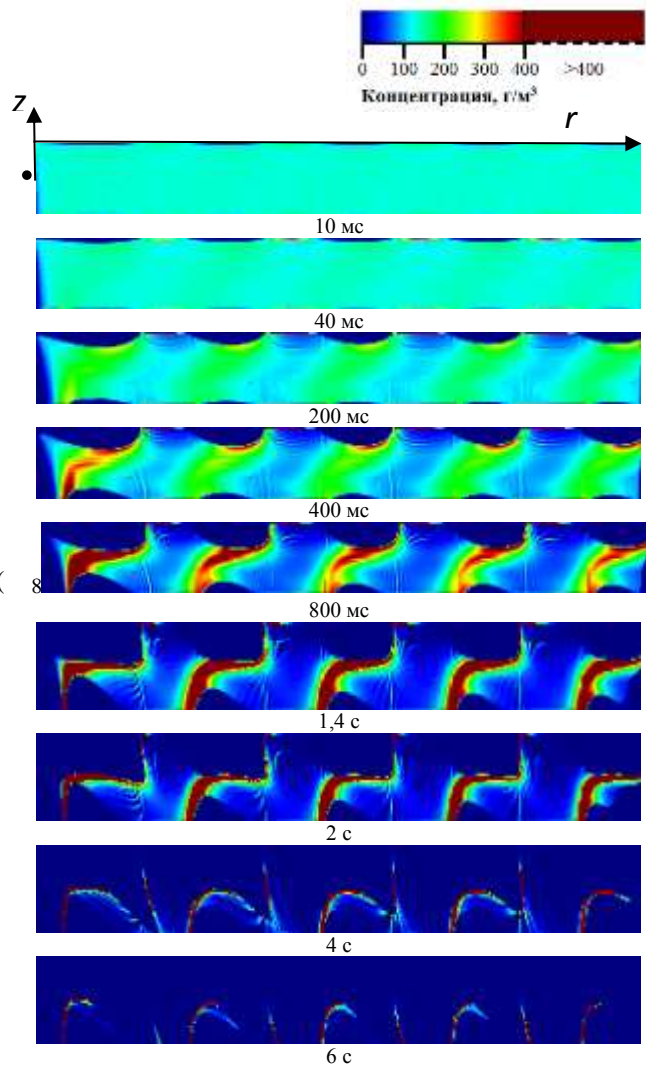


Рис. 5. Распределения массовых концентраций аэрозольных частиц в различные моменты времени (толщина слоя 20 мм)

Как следует из представленных распределений, стационарные акустические течения способствуют локальным повышениям концентрации аэрозольных частиц, что приведёт к увеличению эффективности коагуляции.

Как следует из представленных распределений, в более тонком слое, осаждение частиц происходит за время порядка 6 секунд. В этом случае наблюдается практически равномерное осаждение аэрозоля по всему сечению воздушного зазора между диском и отражателем. Это подтверждает возможность высокоэффективной реализации ультразвуковой очистки газового промежутка от дисперсных примесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения научных исследований были получены следующие результаты:

1. Предложен и обоснован способ повышения эффективности процесса коагуляции путем локального увеличения концентрации взвешенных дисперсных частиц вблизи поверхности отражателя за счет вовлечения их в вихревое движение. Показано, что из-за наличия поглощения энергии УЗ колебаний в газодисперсной среде создаются условия для возникновения эккартовских течений. Причем за счет неравномерности амплитуды колебаний отдельных участков поверхности диска и излучении ими колебаний в противоположных фазах формируются условия для создания замкнутых закрученных потоков.

2. Разработана математическая модель (на основе уравнения Гельмгольца) позволяющая рассчитывать акустическое поле, формируемое в газовом промежутке между изгибно-колеблющимся дисковым излучателем и отражателем. Расчет акустических вихревых потоков осуществляется на основе численного решения уравнения сохранения импульса для осесимметричной функции тока при специально рассчитанной эквивалентной движущей силе, вызванной диссипацией энергии механических УЗ колебаний.

3. Установлено, что в диапазоне уровней звукового давления, не превышающем 160 дБ, характерная ширина каждого вихревого потока совпадает с половиной длины волны изгибных колебаний дискового излучателя.

4. Предварительно проведенные расчеты показали, что формирование акустических вихрей обеспечивает повышение концентрации (более 4-х раз) дисперсных частиц в непосредственной близости от поверхности отражателя, что способствует увеличению вероятности их столкновения. Установлено, что для газового промежутка 16 мм за 6 секунд суммарная масса аэрозольных частиц уменьшается более чем в 3 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Алтайского края в рамках научного проекта 18-48-220001.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. РД 153-34.1-27.301-2001 Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных. – Москва: ОАО «ВТИ», 2003. – 82с.

2. Хмелёв, В.Н. Ультразвук. Газоочистка: монография / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – 534 с.

3. V. N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Sergey N. Tsyganok, Roman N. Golykh, Ksenija V. Shalunova. Experimental Investigations of the Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ultrasonic Frequency on Fogs // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2016. – No. 2 – P. 69–74.

4. Хмелев, В.Н. и др. Измерение акустической мощности, вводимой в газовую среду ультразвуковыми излучателями дискового типа [Текст] / В.Н. Хмелев и др. – Датчики и системы. – 2016. – № 5. – С. 3-11.

5. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.

6. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука [Текст] / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.

7. Руденко, О.В. Теоретические основы нелинейной акустики / О.В. Руденко, С.И. Солюян – М.: Наука, 1975. – 287 с.

8. Sommerfeld, M. A stochastic droplet collision model with consideration of impact efficiency / M. Sommerfeld, S. Blei // ILASS-Europe: Conference Proceedings. – Zaragoza, 2002. – 6 p.

9. Sommerfeld, M. Validation of a stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence // International Journal of Multiphase Flow. – 2001. – Vol. 27. – p. 1829-1858.

10. Crook B. Non-inertial Samplers // Biol. Persp. in Bioaerosols Handbook, edited by C. S. Cox and C. M. Wathes. CRC Press, 1995.

11. Sheng C.D., Shen X.L. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particle // J. of Aerosol Sc. and Tech. 2007. № 41. P. 1.

12. Миоллер Г.В. Теория коагуляции полидисперсных систем // В кн.: Коагуляция коллоидов. Под ред. А.И. Рабиновича и П.С. Васильева. М.–Л.: ОНТИ, 1936. С. 7.

13. Протодяконов И.О., Цибаров В.А., Чесноков Ю.Г. Кинетическая теория газозвесей. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. Цибаров В.А. Кинетический метод в теории газозвесей. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 1997.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., профессор, заведующий каф. МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Голых роман Николаевич, к.т.н., доцент кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432570, e-mail grn@bti.secna.ru

Тертишников Павел Павлович - студент группы ПС-81, кафедра МСИА Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова", тел.: +79237558922, e-mail: tertishnikov.paw@yandex.ru

INFLUENCE OF ACOUSTIC CURRENTS ON THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC COAGULATION

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, P.P. Tertishnikov

Biysk Institute of technology (branch) of the Altai state technical University. I. I. Polzunova", Biysk

The article deals with acoustic flows formed in a thin gap between a flat disk emitter and a reflector. It is shown that the sound pressure gradient that occurs due to the presence of a heater and an aerosol leads to the appearance of vortex-type acoustic flows. Based on the results of modeling, it was found that the formation of acoustic vortices increases the concentration (more than 4 times) of dispersed particles in the immediate vicinity of the reflector surface, which helps to increase the probability of their collision. It was found that for a gas gap of 16 mm, the total mass of aerosol particles decreases by more than 3 times in 6 seconds.

Index terms: gas cleaning, ultrasound, coagulation, gas-dispersed system, aerosol, dust, vibrations, emitter.

REFERENCES

1. RD 153-34. 1-27.301-2001 test Procedure for ash-leavening installations of thermal power plants and boiler houses. - Moscow: VTI, 2003. -- 82С.
2. Khmelev, V. N. Ultrasound. Gas cleaning: monograph / V. N. Khmelev, A.V. Shalunov, R. N. Golykh, V. A. Nesterov. - Barnaul: publishing house of Altai state technical University, 2018. -- 534 p.
3. V. N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Sergey N. Tsyganok, Roman N. Golykh, Ksenija V. Shalunova. Experimental-mental Investigations-of Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ul-trasonic Frequency on Fogs // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. - 2017. - No. 2-p. 69-74.
4. Khmelev, V. N., et al. Measurement of acoustic power introduced into the gas medium by ultrasonic emitters of the dis-K type [Text] / V. N. Khmelev, et al. - Sensors and systems. - 2016. - No. 5. - Pp. 3-11.
5. Physical bases of ultrasonic technology [Text] / Under the editorship of L. D. Rosenberg. - Moscow: Nauka, 1969. - 689 p.
6. Agranat, B. A. Fundamentals of physics and ultrasound technology [Text] / B. A. Agranat [et al.]. - Moscow: Higher school, 1987. -- 352 p.
7. Rudenko, O. V. Theoretical foundations of nonlinear akusti-Ki / O. V. Rudenko, S. I. Soluyan-M. : Nauka, 1975. -- 287 p.
8. Sommerfeld, M. a stochastic droplet collision model with consideration of impact efficiency / M. Sommerfeld, S. Blei // ILASS-Europe: Conference Proceedings. - Zaragoza, 2002. -- 6 p.
9. Sommerfeld, M. Validation of a stochastic Lagrangian mod-elling approach for inter-particle collisions in homo-geneous isotropic turbulence / International Journal of Multiphase Flow. - 2001. - Vol. 27. - p. 1829-1858.
10. Crook B. Non-inertial Samplers // Biol. Persp. in Bioaerosols Handbook, edited by C. S. Cox and C. M. Wathes. CRC Press, 1995.
11. Sheng C.D., Shen X.L. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particle // J. of Aer-ocol Sc. and Tech. 2007. No. 41. P. 1.
12. Myuller GV The theory of coagulation of polydisperse systems // In the book: Coagulation of colloids. Ed. By A.I. Rabinovich and P.S. Vasilieva. M. - L.: ONTI, 1936.S. 7.
13. Protodyakonov I.O., Tsiбаров V.A., Chesnokov Yu.G. Kinetic theory of gas suspensions. L. : Publishing house Leningra. University, 1985. Tsiбаров V.A. Kinetic method in the theory of gas suspensions. SPb. : Publishing House St. Petersburg. University, 1997.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – doctor of technical Sciences, Deputy Director on scientific work of Biysk technological Institute (branch) FGBOU VPO Altai state technical University. I. I. Polzunova, tel. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich-doctor of technical Sciences, Professor, head of the KAF. MSIA, Biysk technological Institute (branch) FGBOU VPO Altai state technical University. I. I. Polzunova, tel. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Golykh Roman Nikolaevich - associate Professor of the Department of MSIA, Biysk technological Institute (branch) of the Polzunov AltSTU, tel. (3854)432570, e-mail gm@bti.secna.ru

Tertyshnikov Pavel Pavlovich-student of the PS-81 group, Department of MSIA of the Biysk technological Institute (branch) of the Altai state technical University. I. I. Polzunova", tel.: +79237558922, e-mail: tertishnikov.paw@yandex.ru