

УДК 534.29.66.084:534-13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В НЕОДНОРОДНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

© 2024 г. В. Н. Хмелев*, А. В. Шалунов**, В. А. Нестеров

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО “Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова”, Алтайский край, Бийск, Россия

**E-mail: vnh@bti.secna.ru*

***E-mail: shalunov@bti.secna.ru*

Поступила в редакцию 06.09.2023 г.

После доработки 03.11.2023 г.

Принята к публикации 04.12.2023 г.

Предложен и экспериментально исследован новый подход к повышению эффективности коагуляции тонкодисперсных аэрозолей за счет формирования вихревых течений в неоднородном ультразвуковом поле. Установлено, что формируемые плоским излучателем в неоднородном ультразвуковом поле вихревые течения обеспечивают повышение эффективности коагуляции при воздействии на газодисперсный поток, инжектируемый в коагуляционную камеру при скорости до 0.2 м/с. При ее превышении нарушается структура суммарного поля скоростей, и частицы аэрозоля пролетают камеру, не успевая взаимодействовать с полем акустических течений за время, достаточное для осаждения на стенках. Эффективность коагуляции за счет вихревых течений линейно возрастает при увеличении уровня звукового давления до 165 дБ. После этого дальнейшего роста эффективности коагуляции не наблюдается. Выявлено, что эффективность коагуляции в сравнении с коагуляцией в однородном ультразвуковом поле для капель размером 0.2–0.6 мкм возрастает на 25%, для капель размером 1.8 мкм – на 20%, а для капель размером более 2.5 мкм прирост эффективности составляет не более 17%.

DOI: 10.31857/S0040364424020164

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что перспективным способом повышения эффективности существующего газоочистного оборудования является агломерация тонкодисперсных частиц за счет воздействия на них в газовом потоке высокоинтенсивными ультразвуковыми (УЗ) колебаниями [1–3]. Образующиеся при таком воздействии агломераты объединенных частиц (либо капли увеличенного диаметра для жидкостных аэрозолей) легче улавливаются с помощью традиционных устройств очистки воздуха, таких как фильтры с волокнистой набивкой и электростатические фильтры [4, 5]. Эффективность ультразвуковой агломерации многократно экспериментально подтверждена для частиц размером от 5 мкм и более. Однако, как показывает ряд исследований, ультразвуковое воздействие становится менее эффективным при уменьшении размеров частиц [6–8].

Снижение эффективности ультразвуковой коагуляции при уменьшении размеров частиц обусловлено двумя типами явлений, сопровождающих взаимодействие частиц в газах [1, 2, 9]: явлений переноса импульса газовой фазы между

частицами; колебательных движений твердых частиц различного размера относительно друг друга.

Первый тип явлений обуславливает гидродинамический механизм коагуляции частиц, впервые описанный в [10]. При его реализации эквивалентные силы гидродинамического взаимодействия (возникающие в результате взаимного искажения полей потока вокруг частиц) приближают частицы друг к другу и обеспечивают их коагуляцию [11, 12]. При этом вероятность столкновения частиц пропорциональна не только силе взаимодействия частиц, но и в первую очередь их концентрации (а фактически расстоянию между частицами).

Второй тип явлений обуславливает ортокINETический механизм, впервые описанный в [13]. При его реализации частицы колеблются с газом не синхронно, а осуществляется “скольжение” относительно газовой фазы, причем частицы колеблются с меньшей амплитудой смещения, чем газ. Эффект скольжения проявляется благодаря инерционности частиц [13]. Отношение амплитуды колебаний частицы к амплитуде колебаний газа называется коэффициентом увлечения.

Коэффициент увлечения зависит от размера частиц, и поэтому столкновения частиц происходят за счет того, что частицы разных размеров колеблются с разной амплитудой (с ненулевой амплитудой друг относительно друга) и случайным образом сталкиваются и объединяются.

Для частиц размером менее 2 мкм модуль коэффициента увлечения близок к единице. В таком случае все частицы колеблются практически синфазно с приблизительно одинаковой амплитудой независимо от значения звукового давления. Соответственно, ортокинетический механизм взаимодействия практически не реализуется. Кроме того, реализация механизма становится невозможной при малых концентрациях частиц, поскольку расстояние между частицами начинает превышать по величине амплитуду смещений молекул газа в УЗ-поле.

По этим причинам размер частиц и расстояние между ними являются определяющими факторами для реализации известных механизмов взаимодействия частиц и ультразвуковое воздействие эффективно только для коагуляции относительно крупных частиц (когда коэффициент увлечения менее единицы) и при высоких счетных концентрациях взвешенных частиц.

Таким образом, физические особенности механизмов ультразвуковой коагуляции, даже при увеличении уровня звукового давления до критических значений (170–180 дБ), вызывающих вторичное разрушение образовавшихся агломератов частиц, не обеспечивают повышения эффективности коагуляции тонкодисперсных частиц (особенно при малых концентрациях, т.е. больших расстояниях между частицами). Поэтому для повышения вероятности столкновения частиц необходимо создавать дополнительное движение частиц, способствующее их столкновению и объединению [6, 12].

Для увеличения вероятности взаимодействия мелких частиц авторами предложено создавать условия возникновения в ультразвуковом поле вторичных эффектов и использовать их для повышения эффективности коагуляции. Одним из наиболее интенсивно проявляющихся вторичных эффектов УЗ-воздействия является эскартовское акустическое течение [6, 14]. При воздействии ультразвуковыми колебаниями в неограниченном пространстве формируемые акустические течения являются однонаправленными и позволяют перемещать частицы в одном направлении (с коэффициентом увлечения, близким к единице) без существенного увеличения вероятности столкновения частиц между собой. Поэтому для увеличения эффективности взаимодействия частиц необходимо интенсифицировать процесс движения частиц в различных направлениях, что-

бы осуществлялось их взаимное перемещение. Это можно обеспечить, в частности, путем размещения препятствия (например, отражателя) на пути звукового ветра в непосредственной близости от излучателя ультразвуковых колебаний.

Известно, что повышению вероятности столкновения частиц может способствовать формирование локальных областей с повышенной концентрацией частиц. Это можно обеспечить путем формирования акустических течений вихревого типа [6, 14, 15]. Очевидно, что вихревые течения позволяют увеличить эффективность коагуляции за счет следующих факторов: увеличения скорости взаимного перемещения частиц; увеличения времени взаимодействия частиц в ультразвуковом поле за счет их удержания в вихревых областях; формирования зон с повышенной концентрацией частиц вблизи внешних границ области вихря.

Цель данного исследования – выявление условий ультразвукового воздействия, обеспечивающих повышение эффективности ультразвуковой агломерации частиц за счет инициирования в озвучиваемой среде акустических течений вихревого характера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для создания различных по структуре ультразвуковых полей и определения эффективности процесса коагуляции частиц (при инициировании вихревых акустических течений) был создан экспериментальный стенд, схематично изображенный на рис. 1.

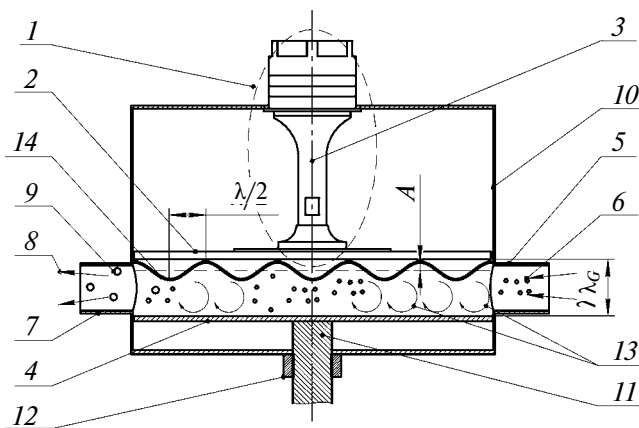


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – УЗ колебательная система (УЗКС), 2 – дисковый излучатель, 3 – пьезопреобразователь, 4 – отражатель, 5 – входной патрубок, 6 – инжектируемый газодисперсный поток, 7 – выходной патрубок, 8 – отходящий газодисперсный поток, 9 – объединенные частицы, 10 – корпус, 11 – ходовой винт отражателя, 12 – ходовая гайка, 13 – вихревые течения, 14 – распределение амплитуд; λ – длина изгибающей волны излучателя, λ_G – расстояние между излучателем и отражателем, A – амплитуда колебаний дискового излучателя.

Представленный стенд позволяет реализовать различные условия воздействия на частицы в газовой среде ультразвуковыми колебаниями, а также определять эффективность ультразвуковой коагуляции по отношению концентрации аэрозоля на выходе и входе коагуляционной камеры.

Для создания ультразвукового поля в коагуляционной камере используется ультразвуковая колебательная система (УЗКС) 1 с дисковым излучателем 2 с центральным возбуждением колебаний при помощи пьезоэлектрического преобразователя 3. Напротив дискового излучателя 2 расположен отражатель 4. Для обеспечения резонансных режимов и установления различных уровней ультразвукового давления на стенде реализована возможность регулировать расстояние между излучателем и отражателем путем перемещения отражателя 4 вдоль вертикальной оси коагуляционной камеры. Для этого отражатель установлен на ходовом винте 11 с ходовой гайкой 12.

Входной 5 и выходной 7 патрубки расположены друг относительно друга на диаметрально противоположных сторонах цилиндрического корпуса коагуляционной камеры 10. Представленный стенд работает следующим образом. Дисперсные частицы поступают во входной патрубке 5 коагуляционной камеры 10. В процессе распространения на инжектируемый газодисперсный поток 6 осуществляется воздействие УЗ-полем, которое формируется между поверхностями отражателя 4 и излучателя 2. Выведение потока газа 8 и укрупненных частиц 9 осуществляется через патрубок 7. Концентрация аэрозоля измеряется во входном и выходном патрубках. По соотношению измеренных концентраций определяется эффективность коагуляции.

Измерение уровня звукового давления осуществлялось шумомером Экофизика-110А (измерения в ультразвуковом диапазоне частот до 40 кГц). Определение дисперсных характеристик частиц осуществлялось при помощи измерителя дисперсных характеристик аэрозоля ТИПАС-1,

который состоит из двух блоков: малоуглового рассеивания для частиц размером 1–100 мкм; спектральной прозрачности для частиц в диапазоне 0.05–2 мкм.

Для определения траекторий движения частиц в коагуляционной камере установлен лазерный построитель плоскости. Лазерная плоскость проходит через ось симметрии излучателя. Видеокамера сфокусирована на плоскость и позволяет производить съемку движения частиц в области между излучателем и отражателем. Форма и распределение потоков газа определяется косвенно, по направлению движения светорассеивающих (трассирующих) частиц [16]. Поэтому предварительно в коагуляционную камеру подавались трассирующие частицы, в качестве которых использовался водный аэрозоль, полученный при помощи ультразвукового медицинского ингалятора.

В качестве коагулируемых частиц решено использовать жидкие частицы (аэрозольная жидкость из ди(2-этилгексил)себацината), создаваемые при помощи ультразвукового распылителя, обеспечивающего формирование аэрозоля со стабильными во времени характеристиками: размеры формируемых частиц – в интервале 0.1–4 мкм.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Представленный стенд реализует различные условия и режимы воздействия высокоинтенсивными УЗ-колебаниями за счет использования двух различных типов ультразвуковых излучателей [17]. На рис. 2 представлены схемы, поясняющие принцип работы изгибно-колеблющихся дисковых излучателей обоих типов.

Соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе. В случае излучения в неограниченную среду такие колебания на некотором расстоянии от излучателя взаимно компенсируются. Это существенно

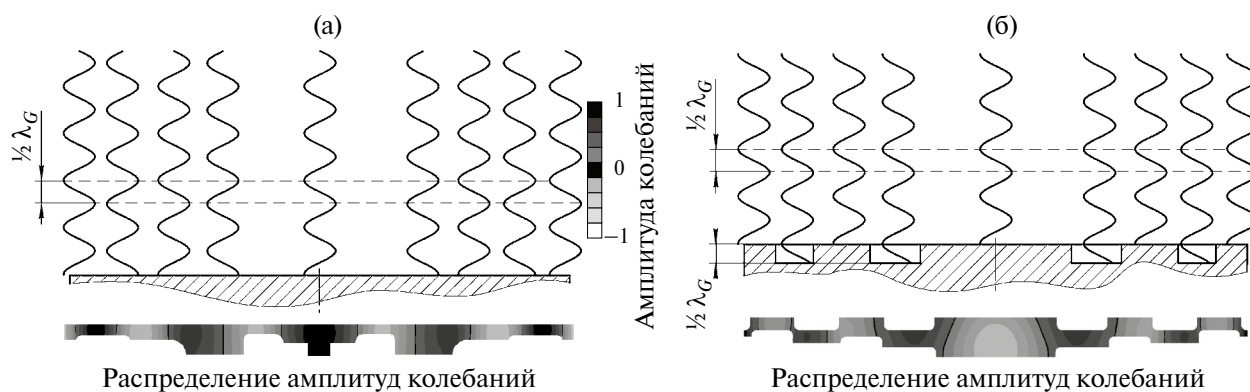


Рис. 2. Схемы формирования УЗ-излучения с помощью изгибно-колеблющихся УЗ дисковых излучателей: (а) – плоский излучатель, (б) – ступенчатый излучатель.

снижает формируемый уровень звукового давления и дальность распространения колебаний. Однако в коагуляционной камере при расстоянии между излучателем и отражателем, не превышающим нескольких длин волн, такой компенсации не происходит, а формируется неоднородное УЗ-поле как в направлении излучения колебаний, так и вдоль радиуса диска.

Создание неоднородного акустического поля с чередующимися зонами сжатия и разрежения (как вдоль акустической оси излучателя, так и в направлении, перпендикулярном ей), колеблющимися в противофазе, обеспечивает формирование вихревых течений. Характерные размеры создаваемых вихревых течений определяются длиной волны УЗ-колебаний в газовой среде, а их количество — расстоянием между соседними участками УЗ-поля, колеблющимися в противофазе (продольными и перпендикулярными), а также размерами излучателя и расстоянием между излучателем и отражателем [6].

Для создания равномерного УЗ-поля (как правило, коагуляцию осуществляют именно в акустических полях такого типа) и обеспечения синфазности излучаемых колебаний профиль фронтальной поверхности излучателя (рис. 2б) выполнен ступенчато-переменным. Местоположение и размеры фронтальных выступов или углублений и определяют основные характеристики акустического поля, формируемого излучателем. При этом ступенчатые переходы выполняются в зонах узловых окружностей (в которых амплитуда колебаний равна нулю) с высотой, равной половине длины волны УЗ-колебаний в газовой среде.

Излучатели изготовлены из титанового сплава ВТ1-0. Каждый излучатель диаметром 320 мм соединен с пьезоэлектрическим преобразователем и снабжен электронным генератором для питания пьезопреобразователя (максимальная выходная мощность — 800 Вт). Резонансная частота излучателей: плоского — 22.1 кГц, ступенчатого — 22.5 кГц. При проведении экспериментальных исследований каждый излучатель работал на своей резонансной частоте. Возможность регулирования мощности электронного генератора позволяет определить степень повышения эффективности коагуляции частиц в зависимости от уровня звукового давления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения параметров акустического поля уровень звукового давления определялся в промежутке между поверхностями излучателя и отражателя при различных расстояниях между

ними. Экспериментально определено, что максимальное значение уровня звукового давления, формируемое излучателем с плоской поверхностью, составляет 172 дБ, а излучателем с фазовыравнивающими кольцевыми выступами — 171 дБ при расстоянии между излучателем и отражателем, равном длине волны УЗ-колебаний в воздухе на частоте воздействия $\lambda_G = 15$ мм для плоского, $\lambda_G = 14.7$ мм для ступенчатого излучателя.

Распределение акустических течений. Первоначально проведены исследования, направленные на подтверждение возможности формирования вихревых акустических течений при воздействии в объеме коагуляционной камеры плоским дисковым излучателем. Для этого между излучателем и отражателем устанавливалось определенное ранее оптимальное расстояние, при котором формируется стоячая волна и обеспечивается максимум уровня звукового давления ($\lambda_G = 15$ мм для плоского; $\lambda_G = 14.7$ мм для ступенчатого излучателя). На рис. 3 представлены фото распределения светорассеивающих (трассирующих) частиц в коагуляционной камере.

Выявлено, что при использовании ступенчатого излучателя (рис. 3а) формируется стоячая волна с тремя узловыми плоскостями, в которые перемешаются и коагулируют капли. Дальнейшей коагуляции капель не происходит из-за удерживания уже сформированных капель в узлах стоячей

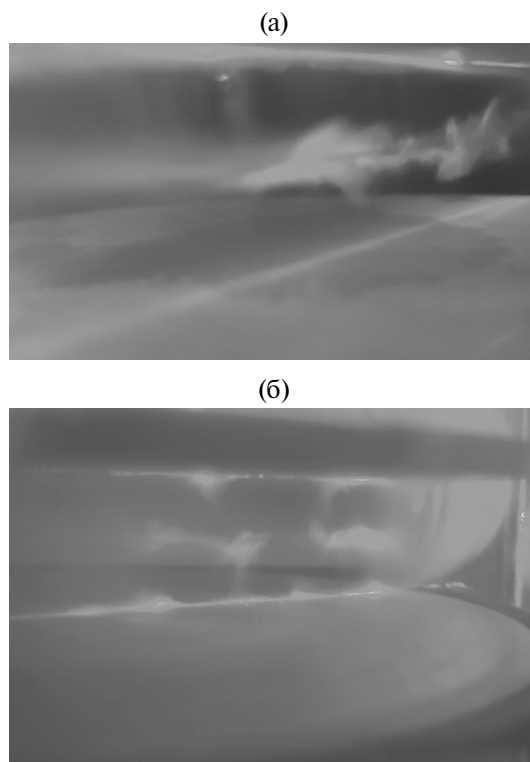


Рис. 3. Распределение трассирующих частиц в коагуляционной области для плоского (а) и ступенчатого (б) излучателей.

волны. При этом не происходит взаимного перемещения частиц в пределах узловой зоны без наличия какого-либо дополнительного принудительного потока газа. При этом формирования вихревых течений практически не происходит.

При использовании плоского излучателя (рис. 3б) обнаружены интенсивные вихревые течения, образующиеся за счет смежно расположенных колеблющихся в противофазе УЗ-полей. В результате этого частицы включаются в вихревое движение как в пределах одной узловой области, так и между ними через зоны низкого уровня звукового давления, расположенные вблизи (напротив) нулей колебаний дискового излучателя. При этом, кроме коагуляции частиц в узловых областях, происходит их дополнительное взаимное вихревое перемещение и взаимодействие между собой, что приводит к увеличению эффективности коагуляции. Изменение расстояния в большую или меньшую сторону относительно резонансного расстояния приводит к тому, что течения практически не формируются.

Определение эффективности коагуляции и осаждения частиц. Поскольку основная задача УЗ-коагуляции — это увеличение частиц до размеров, при которых они могут быть легко отделены от несущей газовой фазы, то эффективность коагуляции оценивалась по степени осаждения аэрозоля в коагуляционной камере. Эффективность УЗ-коагуляции однозначно связана со степенью осаждения частиц, поскольку без УЗ-воздействия осаждения частиц в коагуляционной камере не происходит (менее 4%), т.е. частицы полностью увлекаются газовым потоком и не осаждаются, а полученные значения не превышают погрешности измерений.

Эффективность коагуляции и осаждения частиц оценивалась по отношению массовой концентрации аэрозоля на выходе и входе коагуляционной камеры и рассчитывалась при помощи следующего выражения:

$$N = \left(1 - \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}}\right) \times 100\%,$$

где N — эффективность коагуляции, %; C_{out} — осредненная за 60 с массовая концентрация аэрозоля на выходе из экспериментального стенда, г/м³; C_{in} — осредненная за 60 с массовая концентрация аэрозоля на входе в экспериментальный стенд, г/м³.

Считалось, что уменьшение массовой концентрации капель происходило из-за их укрупнения и осаждения на отражатель под действием акустических течений либо радиационного давления (для ступенчатого излучателя).

Зависимость эффективности коагуляции от расхода газодисперсного потока. На следующем эта-

пе определялась зависимость эффективности коагуляции частиц от скорости инжектируемого воздушного потока в камере. Исследования проводились при следующих условиях: скорость инжектируемого потока в коагуляционной камере изменялась в пределах 0.1–0.85 м/с; уровень звукового давления составлял 165 дБ; начальная массовая концентрация $N_{\text{in}} = 1.5 \times 10^{-3}$ г/м³. Результаты представлены на рис. 4. Видно, что при минимальной и максимальной скоростях потока эффективность осаждения частиц без применения УЗ-воздействия не превышала 4% и 2% соответственно.

Эффективность коагуляции частиц обратно пропорциональна скорости инжектируемого воздушного потока. Отмечено, что для плоского излучателя эффективность коагуляции изначально выше, чем для ступенчатого — на 10%. Это обусловлено тем, что аэрозольные частицы увлекаются вихревыми акустическими течениями, которые многократно перемещают их через области повышенной концентрации частиц (узловые области) и инициируют столкновение и осаждение частиц на отражателе. При возрастании скорости входящего в коагуляционную камеру газодисперсного потока (до 0.2 м/с) эффективность коагуляции остается приблизительно постоянной и равной 76%, а для ступенчатого снижается до 55%.

При этом прирост эффективности для плоского излучателя относительно ступенчатого достигает максимального значения и составляет 21%. Однако по мере того, как скорость инжектируемого в коагуляционную камеру газодисперсного потока продолжает увеличиваться (до 0.4 м/с), акустические течения становятся незначительными в поле скоростей основного потока. В результате относительная эффективность коагуляции снижется. Начиная со скорости воздушного потока, равной 0.6 м/с, эффективности коагуляции для обоих типов излучателей сравниваются. При этом в результирующем поле скоростей вихревая составляющая становится пренебрежимо малой и не оказывает влияния на процесс УЗ-коагуляции.

Влияние уровня звукового давления на эффективность коагуляции. При определении зависимости эффективности коагуляции от уровня звукового давления массовая концентрация аэрозоля на входе поддерживалась равной $N_{\text{in}} = 1.5 \times 10^{-3}$ г/м³, а скорость воздушного потока — 0.2 м/с. На рис. 5 представлены полученные зависимости.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что при начальном уровне звукового давления $L = 130$ дБ эффективность коагуляции практически не зависит от типа используемого излучателя, прирост эффективности за счет вихревых течений практически отсутствует, что свидетельствует о малой скорости

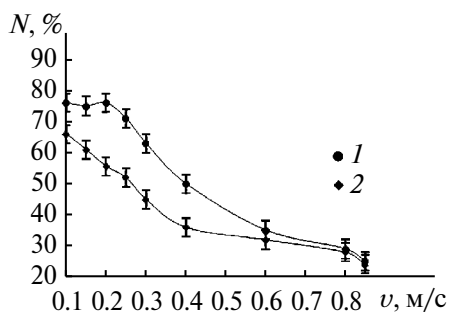


Рис. 4. Зависимости эффективности коагуляции и осаждения капель от скорости воздушного потока: 1 – плоский излучатель, 2 – ступенчатый излучатель.

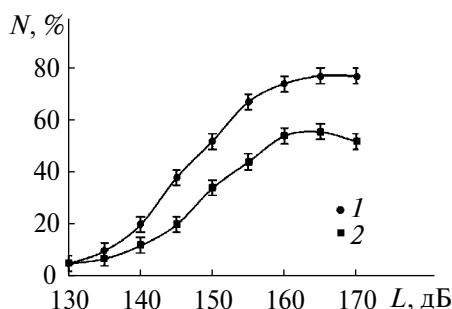


Рис. 5. Зависимости эффективности коагуляции и осаждения капель от уровня звукового давления: 1 – плоский излучатель, 2 – ступенчатый излучатель.

вихревых течений, недостаточной для сближения и объединения частиц.

При увеличении уровня звукового давления наблюдается повышение эффективности коагуляции и осаждения частиц. Увеличение эффективности при воздействии плоским излучателем (неоднородное УЗ-поле) оказывается более значительным. Так, при уровне звукового давления 155 дБ рост эффективности составляет 23%. Это связано с увеличением скорости вихревых течений при повышении уровня звукового давления. Однако при уровне звукового давления 155 дБ эффективность коагуляции и осаждения капель еще не достигла своих предельных значений, поэтому уровень звукового давления необходимо повышать.

Рост эффективности продолжается до достижения значений 165 дБ, при этом для ступенчатого излучателя (однородное УЗ-поле) эффективность составляет не более 55%. В свою очередь формируемые плоским излучателем вихревые акустические течения уже при уровне звукового давления 155 дБ позволяют увеличить эффективность коагуляции и осаждения до 67%, а при достижении максимального уровня звукового давления 165–170 дБ до 77%. Это на 21% выше, чем для ступенчатого излучателя, формирующего равномерное поле.

Также выявлено, что для ступенчатого излучателя, генерирующего равномерное акустическое

поле, при превышении значения 165 дБ наблюдается некоторое снижение эффективности коагуляции (до 52%). Это объясняется вторичным разрушением в УЗ-поле крупных капель (образовавшихся в результате коагуляции аэрозоля) и удалении их из коагуляционной камеры с потоком инжектируемого воздуха. В свою очередь для плоского излучателя такого снижения не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что мелкие капли, образовавшиеся при разрушении крупных, не покидают коагуляционную камеру, а, вовлекаясь в вихревое движение, осаждаются на отражателе.

Влияние массовой концентрации на эффективность улавливания частиц. Для определения влияния массовой концентрации частиц на эффективность улавливания были проведены экспериментальные исследования при уровне звукового давления 165 дБ, скорости воздушного потока 0.2 м/с. Полученные результаты показаны на рис. 6.

При сравнении зависимостей на рис. 6 установлено, что при использовании плоского дискового излучателя и малой концентрации частиц эффективность коагуляции существенно превышает эффективность ступенчатого излучателя. Эффективность коагуляции при использовании ступенчатого излучателя (генерирующего равномерное поле) с увеличением концентрации частиц возрастает практически линейно (до концентрации $25 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$) и достигает своего максимального значения 80% при концентрации $30 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$. В то время как для плоского излучателя эффективность достигла 80% при концентрации $25 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$. Максимальное значение эффективности коагуляции для плоского излучателя составило 82%.

Также из представленных зависимостей следует, что для плоского излучателя при концентрациях до $N_{in} = 10 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$ происходит нелинейный рост эффективности улавливания частиц. При этом относительный прирост эффективности для плоского излучателя обратно пропорционален концентрации аэрозоля и достигает наибольших

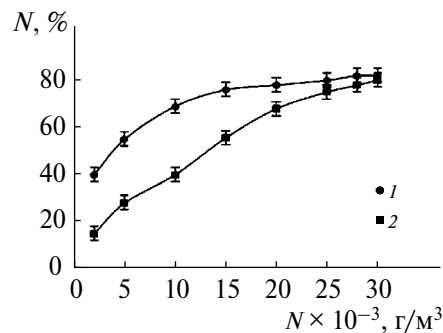


Рис. 6. Зависимости эффективности улавливания от массовой концентрации частиц: 1 – плоский излучатель, 2 – ступенчатый излучатель.

значений при концентрациях, не превышающих $N_{in} = 15 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$. Как уже упоминалось, оба излучателя работали при одинаковом уровне звукового давления, поэтому можно предположить, что такая разница связана с формированием определенной структуры вихревых акустических течений плоским излучателем.

При концентрации $N_{in} = 15 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$ и выше рост эффективности замедляется, а при концентрации выше $25 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$ эффективности улавливания становятся практически одинаковыми для обоих типов излучателей. Это происходит, поскольку при указанных концентрациях расстояния между частицами оказываются достаточными для реализации механизмов ортокинетического и гидродинамического механизмов коагуляции частиц, и влияние вихревых течений слабо сказывается на повышении вероятности столкновения частиц.

Определение фракционной эффективности. На последнем этапе проведения экспериментов была определена фракционная эффективность коагуляции и осаждения аэрозоля. Эксперименты проводились при следующих условиях: концентрация аэрозоля на входе $N_{in} = 15 \times 10^{-3} \text{ г/м}^3$, скорость воздушного потока – 0,2 м/с. Исходный дисперсный состав жидкостного аэрозоля показан на рис. 7.

Для определения фракционной эффективности коагуляции и осаждения аэрозоля весь диапазон размеров частиц разделялся на 20 интервалов. В каждом диапазоне эффективность коагуляции частиц определялась при помощи следующего выражения:

$$K_{(i)} = \left(\frac{C_{\text{off}(i)} - C_{\text{on}(i)}}{C_{\text{off}(i)}} \right) \times 100\%,$$

где $K_{(i)}$ – эффективность коагуляции для i -го интервала, %; $C_{\text{off}(i)}$, $C_{\text{on}(i)}$ – осредненные за 60 с для i -го интервала массовые концентрации аэрозоля на выходе из экспериментального стенда при отсутствии и наличии ультразвукового поля, г/м^3 .

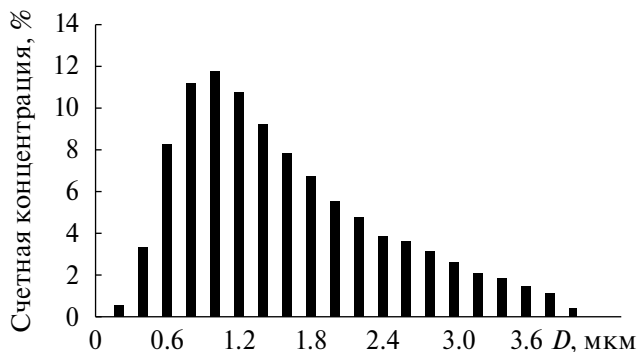


Рис. 7. Исходный дисперсный состав жидкостного аэрозоля.

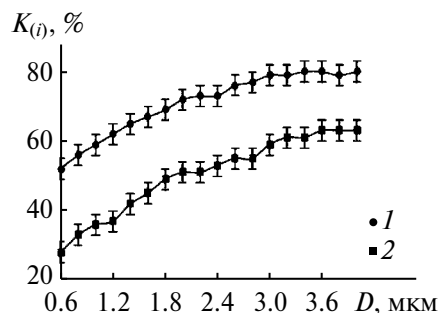


Рис. 8. Фракционная эффективность коагуляции и осаждения частиц: 1 – плоский излучатель, 2 – ступенчатый излучатель.

В результате получены данные о фракционной эффективности осаждения аэрозоля, показанные на рис. 8. Полученные зависимости позволяют утверждать, что использование плоского излучателя, создающего неоднородное акустическое поле и формирующего вихревые течения, обеспечивает большую эффективность коагуляции и осаждения во всем диапазоне исследованных размеров капель. При этом наибольший прирост эффективности наблюдается для капель субмикронного диапазона размеров. Так, для капель размером 0,2–0,6 мкм эффективность коагуляции частиц в неоднородном поле возрастает на 25%, для капель размером 1,8 мкм – на 20% (от 49% до 69%), а для капель размером более 2,5 мкм прирост эффективности составляет не более 17%. По-видимому, это связано с малым временем релаксации мелких частиц. Они легко вовлекаются в вихревое движение и перемещаются со скоростью вихря, обгоняя более крупные частицы и сталкиваясь с ними. Кроме этого, поскольку вихревые течения формируются между смежно расположенными областями, колеблющимися в противофазе, это существенно повышает взаимодействие частиц, расположенных в узловых зонах (на границе между областями, колеблющимися в противофазе). Это делает перспективным применение предложенного подхода для коагуляции тонкодисперсных аэрозолей.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили, что повышение эффективности УЗ-коагуляции возможно за счет создания акустических течений вихревого типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы предложен и исследован новый подход к повышению эффективности коагуляции тонкодисперсных аэрозолей. Повышение эффективности достигнуто за счет формирования при помощи изгибно-колеблющегося плоского дискового излучателя неоднородного ультразвукового поля. В таком поле формируются зоны, в которых колебания

совершаются в противофазе как вдоль акустической оси излучателя, так и в направлении, перпендикулярном ей. Это обеспечивает формирование акустических течений вихревого типа, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними, что увеличивает вероятность их столкновения. Кроме того, вихревые течения обеспечивают эффективное осаждение образовавшихся в результате коагуляции крупных капель на отражателе.

Экспериментально установлено, что акустические вихревые течения, формируемые плоским излучателем, сохраняют свою структуру до значительной скорости инжектируемого в коагуляционную камеру газодисперсного потока, равных 0.2 м/с. При ее превышении нарушается структура суммарного поля скоростей, и частицы аэрозоля пролетают камеру не успевая взаимодействовать с полем акустических течений за время, достаточное для осаждения на стенках.

Выявлено, что рост эффективности коагуляции за счет вихревых течений прямо пропорционален уровню звукового давления и продолжается до 165 дБ, после чего практически не зависит от звукового давления. При этом обеспечивается прирост эффективности до 20% относительно коагуляции в равномерном УЗ-поле. Также установлено, что вихревые течения, формируемые плоским излучателем, обеспечивают наибольший прирост эффективности при относительно невысоких концентрациях аэрозоля.

Анализ фракционной эффективности предложенного подхода позволил показать, что эффективность коагуляции и осаждения возрастает для капель размером 0.2–0.6 мкм на 25%, для капель размером 1.8 мкм – на 20%, а для капель размером >2.5 мкм – не более 17%. Это делает перспективным применение предложенного подхода для коагуляции тонкодисперсных аэрозолей.

Поскольку представленный подход реализуется только при относительно невысоких скоростях движения газодисперсного потока через коагуляционную камеру, то для его практического применения коагуляционную камеру предлагается изготавливать в виде регулярного набора параллельно установленных плоских ультразвуковых излучателей (на расстоянии двух длин волн ультразвуковых колебаний в воздухе друг от друга) с равноудаленно размещенными между ними отражателями. За счет распределения газодисперсного потока между параллельно установленными излучателями и отражателями будет достигаться производительность коагуляции газодисперсного потока, достаточная для практического применения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00121 (<https://rscf.ru/project/19-19-00121/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 263 с.
2. Розенберг Л.Д. Физика и техника ультразвука / Под ред. Розенберга Л.Д. М.: Наука, 1970. 685 с.
3. Губайдуллин Д.А. Динамика двухфазных парагазокапельных сред. Казань: Изд-во Казанск. мат. общ-ва, 1998. 156 с.
4. Пищуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А. Унос частиц из циклонной камеры // ИФЖ. 2012. Т. 3. № 3. С. 1196.
5. Тукмаков А.Л., Кашапов Н.Ф., Тукмаков Д.А., Фазльяхматов М.Г. Процесс осаждения заряженной полидисперсной газозвеси на поверхность пластины в электрическом поле // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 499.
6. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 312.
7. Sheng C., Shen X. Simulation of Acoustic Agglomeration Processes of Poly-disperse Solid Particles // Aerosol Sci. Technol. 2007. V. 41. № 1. P. 1.
8. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion // Mater. Int. Conf. Digital Manufac. Automation. Changsha, 2010. P. 702.
9. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Волновая динамика газозвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 443.
10. König W. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren // Ann. Phys. Chem. 1891. Bd. 42. Hf. 4. S. 549.
11. Тукмаков А.Л., Ахунов А.А. Эволюция состава и изменение характера колебаний коагулирующей газозвеси в волновом поле акустического резонатора // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 873.
12. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 146.
13. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. Zur Theorie der Akustischen Koagulation // Kolloid-Zeitschrift. 1936. Bd. 77. S. 103.
14. Yuen W.T., Fu S.C., Chao C.Y. The Correlation between Acoustic Streaming Patterns and Aerosol Removal Efficiencies in an Acoustic Aerosol Removal System // Aerosol Sci. Technol. 2016. V. 50. № 1. P. 52.
15. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Improving the Separation Efficient of Particles Smaller than 2.5 Micrometer by Combining Ultrasonic Agglomeration and Swirling Flow Techniques // PLoS One. 2020. V. 15. № 9. P. e0239593.
16. Вараксин А.Ю. К выбору инерционности частиц, используемых для оптической диагностики высокоскоростных газовых потоков // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 411.
17. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of High-frequency Langevin Transducers Vibrations for Increasing of Ultrasonic Radiator Power // Ultrasonics. 2021. V. 114. P. 106413.