

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ С ЖИДКОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт, г. Бийск

В статье приведены результаты исследований коагуляции аэрозоля с жидкой дисперсной фазой. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовались пьезоэлектрические колебательные системы с дисковыми излучателями различного диаметра, способные создавать колебания с частотой более 25 кГц и уровнем звукового давления более 130 дБ. Показано, что ультразвуковое воздействие позволяет сократить время осаждения аэрозоля от 3,7 до 10 раз, в зависимости от характеристик используемого излучателя.

Ключевые слова: аэрозоль, ультразвуковое воздействие, излучатель.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с ростом и бурным развитием промышленности большое внимание уделяется проблеме удалению вредных выбросов в атмосферу. К числу вредных выбросов содержащихся в промышленных газах следует отнести пыль, туман и дым.

Особую опасность представляют промышленные туманы. Туманы состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации паров или распылении жидкости. Почти весь туман, образующийся в промышленности, является мелкодисперсным – размер частиц менее 3 мкм. Поэтому такой аэрозоль особенно опасен для здоровья людей из-за своей способности проникновения в альвеолы легких и кровеносную систему человека. В промышленности туманы образуются при реализации различных технологических процессов: получения серы, различных солей упаркой, производства серной кислоты и термической фосфорной кислоты, в результате применения смазочно-охлаждающих жидкостей и т.д.

Циклоны, фильтры и скрубберы различных конструкций и размеров, пылеуловители, осадительные камеры, туманоулавители – это далеко не полный список газоочистного оборудования применяемого на практике. Однако, несмотря на довольно широкий спектр существующего оборудования, его основным недостатком является низкая эффективность очистки промышленного газа от мелкодисперсного аэрозоля (степень очистки менее 70% для частиц с размером 5 мкм и менее).

Попытки совершенствования вышеуказанного оборудования не приводят к значительному повышению эффективности. Это связано с тем, что используемое оборудование в той или иной степени уменьшает свою эффективность при увеличении дисперсности пыли. В связи с этим, возможным способом повышения эффективности

улавливания промышленного тумана является использование нового вида энергии, способствующего повышению эффективности процесса улавливания за счет укрупнения исходных частиц. Одним из наиболее перспективных способов является коагуляция под действием ультразвуковых колебаний.

Преимуществами ультразвуковой коагуляции являются: возможность осаживать высокодисперсные аэрозоли; применимость к агрессивным и взрывоопасным газам; возможность работы при высоких температурах и давлениях; высокая эффективность и низкая энергоёмкость процесса.

К сожалению, попытки практического применения ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газовых выбросов до настоящего времени не получили широкого распространения.

Это обусловлено тем, что применяемыми до настоящего времени излучателями акустических колебаний были динамические или статические сирены, характеризующиеся существенными недостатками (низкий КПД; быстрый износ механических узлов абразивными частицами в сжатом газе; необходимость использования мощных и дорогих компрессоров; низкая интенсивность акустического излучения на частотах ультразвукового диапазона).

Теоретические исследования процесса ультразвуковой коагуляции показывают, что для эффективной коагуляции достаточно грубодисперсных аэрозолей с частицами размером порядка 40...50 мкм хороший результат получается при частотах от 2 до 6 кГц [1, 2], которые создаются с помощью аэродинамических излучателей. Экспериментальные данные [1, 3] показывают, что проявление процесса коагуляции начинается с уровня звукового давления в 130 дБ.

Поэтому для эффективной коагуляции мелкодисперсного аэрозоля (размер частиц менее 5 мкм) требуется акустическое воздействие колебаниями с частотой более 20 кГц и уровнем

звукового давления более 130 дБ [4,5], что невозможно обеспечить при использовании аэродинамических излучателей.

Для обеспечения указанных характеристик акустического поля в Бийском технологическом институте, были разработаны излучатели на основе пьезоэлектрических колебательных систем, способные генерировать высокоинтенсивные акустические колебания высокой частоты (частота колебаний не менее 25кГц, уровень звукового давления не менее 130 дБ) и являющиеся наиболее эффективной альтернативой существующим излучателям [6-8]. В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований возможности разрушения мелкодисперсного аэрозоля разработанными излучателями.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований была разработана лабораторная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять регистрацию изменений плотности и дисперсного состава тумана в процессе его разрушения. Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Фотография лабораторной установки

Разработанная лабораторная установка для исследования процесса ультразвуковой коагуляции конструктивно состоит из аэрозольной камеры (объем 1,25 м³), источников для создания аэрозоля, созданных ультразвуковых излучателей, измерительного и вспомогательного оборудования (вентилятор для равномерности заполнения внутреннего пространства аэрозольной камеры; шумомера для измерения уровня звукового давления предназначен микрофон; оптические датчики).

Для проведения экспериментальных исследований было использовано 4 излучателя, отличающихся диаметром диска и уровнем создаваемого звукового давления. Технические характеристики излучателей приведены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики созданных излучателей

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
2	Диаметр диска излучателя, мм	250; 320; 360; 420
3	Максимальная потребляемая мощность, не более ВА	270; 270; 400; 600
4	Диапазон регулирования мощности излучения, %	10-100

5	Масса, кг, не более	5
6	Уровень звукового давления на расстоянии 1 м, дБ, не менее	140; 144; 146; 150
7	Частота механических колебаний, кГц	27±2,0

Для увеличения площади излучающей поверхности (использования излучения обратной стороны диска) излучатель был снабжен отражателем специальной формы. Внешний вид излучателя диаметром 250 мм показан на рис. 2.

Для имитации промышленного тумана в аэрозольной камере используются ультразвуковые ингаляторы серии «Муссон 2» (производительность ингалятора 1.2 мл/мин, средний размер частиц не более 3...5 мкм). Принцип действия заключается в распылении жидкости фокусированными колебаниями на частоте 2,56 МГц. Применение подобных ингаляторов позволяет получить воздушно-капельную дисперсию с требуемым размером частиц.



Рис. 2. Фото излучателя в сборе с отражателем

Для получения более однородного распределения частиц, аэрозоль, создаваемый ингалятором, некоторое время отстаивался. В результате отстаивания более крупные капельки аэрозоля под действием силы тяжести осаждались на дно аэрозольной камеры, а в воздухе оставалась наиболее мелкая фракция (средний размер менее 3 мкм).

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Перед проведением экспериментов, связанных с ультразвуковым разрушением мелкодисперсного тумана, были проведены измерения по определению распределения уровня звукового давления в аэрозольной камере. Распределения ультразвуковых колебаний были получены в плоскости ABCD, как показано на рис. 3.

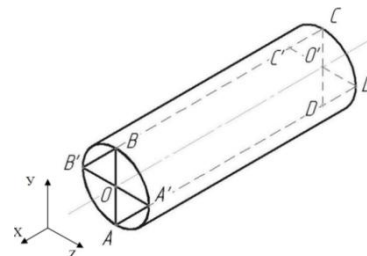


Рис. 3. Плоскости аэрозольной камеры для определения распределения уровня звукового давления

На рис. 4 представлено распределения уровня звукового давления в плоскости ABCD.

Среднее значение уровня звукового давления в аэрозольной камере по результатам измерений составило 134,1 дБ, что является достаточным для интенсификации процесса разрушения тумана [1, 3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все экспериментальные исследования, проводимые в аэрозольной камере, были разделены на два этапа.

1. Исследование эволюции дисперсного состава тумана в аэрозольной камере под воздействием ультразвуковых колебаний и при его естественном разрушении с течением времени.

2. Определение времени разрушения тумана под воздействием ультразвуковых колебаний.

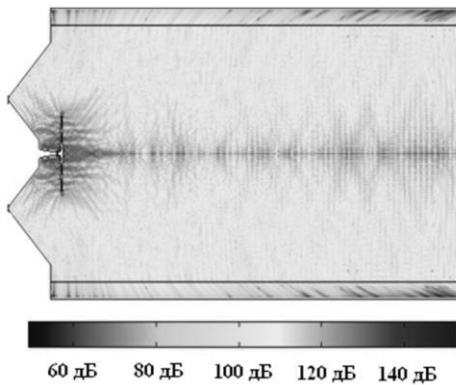


Рис. 4. Распределение уровня звукового давления, создаваемого дисковым излучателем

При проведении экспериментов камера наполнялась туманом в течение 10 минут. Для равномерного заполнения камеры воздушно-капельной дисперсией внутри камеры работали тихоходные вентиляторы, создавая дополнительные потоки со средней скоростью 0.2 м/с. Далее осуществлялся отбор проб: через каждые 40 с для случая естественного разрушения тумана и каждые 20 с при воздействии акустическими колебаниями. Эксперимент продолжался в течение 5 минут.

Для качественной оценки ультразвукового воздействия проводилась фотосъемка контрастных монохромных графических объектов, размещенных в объеме аэрозольной камеры, как показано на рис. 5.а –5.г.

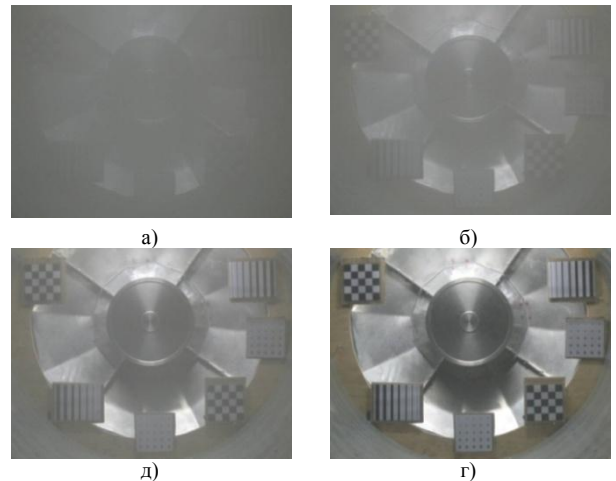
Дисперсный состав аэрозоля определялся при помощи метода спектральной прозрачности, реализующей оптический способ определения дисперсности субмикронных частиц [9].

На рис. 6 представлены зависимости, характеризующие изменение среднего диаметра частиц тумана в процессе его разрушения.

Как и следовало ожидать, при осуществлении ультразвукового воздействия происходит увеличение среднего диаметра капель тумана (от 3 мкм до 11 мкм), за счет их коагуляции. Это позволяет сделать вывод, что время разрушения

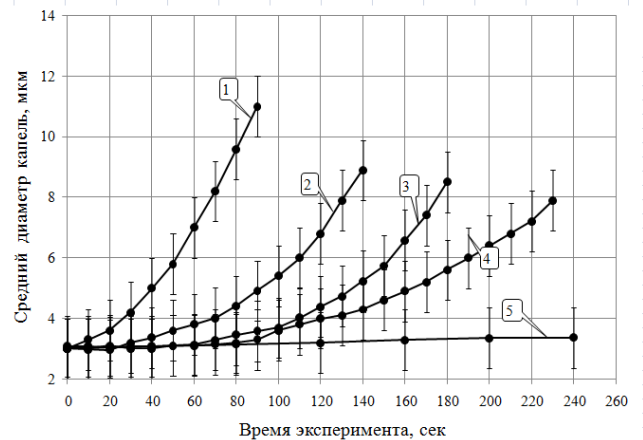
тумана значительно сократиться, так как укрупненные в процессе коагуляции частицы тумана будут более интенсивно осажаться за счет действия силы тяжести. При этом в контрольном эксперименте, без акустического воздействия, за максимальное время проведения эксперимента (5 минут) эволюция дисперсного состава аэрозоля практически не происходила.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о высокой эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей. Это позволяет предположить, что введение источника ультразвуковых колебаний в уже существующие газоочистные аппараты будет способствовать повышению степени очистки газов, за счет осаждения укрупненных частиц. Известно, что степень очистки газовых поток существенно зависит от размера взвешенных частиц. Так для частиц размером 2.5 мкм степень очистки в циклонах, скрубберах составляет всего 40–50%. В то время как, степень улавливания частиц размером 15...20 мкм составляет уже 80%.



а) 1 минута после начала эксперимента; б) 1 минута и 30 секунд после начала эксперимента; в) 2 минуты после начала эксперимента; г) 3 минуты после начала эксперимента.

Рис. 5. Фотографии динамики процесса рассеивания тумана в ходе воздействия излучателем диаметром 320 мм



1 – воздействие излучателем диаметром 420 мм; 2 – воздействие излучателем диаметром 360 мм; 3 – воздействие излучателем

диаметром 320 мм; 4 – воздействие излучателем диаметром 250 мм; 5 – без акустического воздействия

Рис. 6. Зависимость изменения среднего диаметра воздушно-капельной дисперсии в процессе ее разрушения

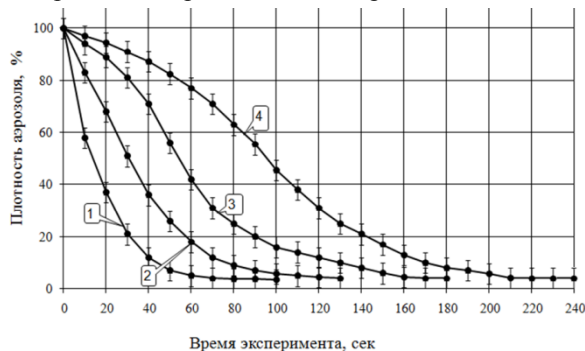
В ходе проведения следующего этапа экспериментов в аэрозольной камере были получены данные, характеризующие скорость и эффективность процесса ультразвуковой коагуляции

Время разрушения тумана под действием ультразвуковых колебаний оценивалось при помощи косвенных измерений (с интервалом 1 сек) плотности аэрозоля, с помощью оптического датчика установленной в центральной части аэрозольной камеры перпендикулярно ее оси в горизонтальной плоскости.

В качестве оптического приемника был использован фотодетектор VT53N1, в качестве источника света полупроводниковый лазер, видимого диапазона с длиной волны 650 нм мощностью 5 мВт.

Наполнение камеры прекращалось в момент достижения фотодетектором сопротивления 36 кОм, что соответствует равномерно серому фотоснимку. Этот уровень был принят за плотность аэрозоля равной 100%. При полном разрушении аэрозоля, имитирующего промышленный туман, сопротивление фотодатчика составило 6 кОм, что было принято за 0%.

На рис. 7 представлены зависимости плотности аэрозоля от времени в аэрозольной камере в ходе проведения экспериментов.



1 – воздействие излучателем диаметром 420 мм; 2 – воздействие излучателем диаметром 360 мм; 3 – воздействие излучателем диаметром 320 мм; 4 – воздействие излучателем диаметром 250 мм

Рис. 7. Изменение плотности аэрозоля, имитирующего промышленный туман, в ходе проведения экспериментов

Из приведенных зависимостей следует, что время коагуляции аэрозоля становится тем меньше, чем больше диаметр используемого излучателя и уровень генерируемого звукового давления. При этом минимальный промежуток времени, за который происходило разрушение аэрозоля в камере в результате ультразвукового воздействия, составил 90 сек. При этом время естественного осаждения исследуемого аэрозоля

составило 900 сек. Таким образом, наложение ультразвуковых колебаний позволяет сократить время коагуляции до 10 раз.

При использовании самого маломощного излучателя диаметром 250 мм, время разрушения тумана сократилось в 3,7 раза.

Анализ зависимостей на рис. 8 позволяет предположить, что применение больших по диаметру и мощности ультразвуковых излучателей позволит еще более значительно сократить временные промежутки, необходимые для достижения требуемого значения видимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. При осуществлении ультразвукового воздействия происходит увеличение среднего диаметра капель тонкодисперсного аэрозоля (от 3 мкм до 11 мкм), за счет их коагуляции.

2. Применение ультразвукового воздействия позволяет сократить время разрушения аэрозоля с жидкой дисперсной фазой до 10 раз.

3. На основании полученных результатов, установлено, что применение более мощных излучателей существенно сократит время разрушения аэрозолей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 688 с.
2. Фукс, Н. Механика аэрозолей [Текст] / Под. ред Б.В. Дерягин. – М.: Издательство академии наук СССР, 1955. - 352 с.
3. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / Под ред. Ю.Я. Косого. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
4. Хмельёв В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. Исследование процесса коагуляции частиц под воздействием ультразвуковых колебаний [Текст] // Межвузовский сборник «Инновационные технологии: производство, экономика, образование», 2009. С. 335-342
5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golyh R.N., Shalunova K.V. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems [Текст] // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333
6. Хмельёв В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Лебедев А.Н. Многочастотная ультразвуковая колебательная система с дисковым излучателем для акустического воздействия на агрессивные и взрывоопасные газовые среды [Текст] // Современные проблемы технической химии. Материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции, 2009. Секция 5-7. С. 21 – 26
7. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Shalunov A.V., Lebedev A.N., Galahov A.N., Shalunova K.V. Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk [Текст] // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.250-253
8. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V. The Acoustical Coagulation of Aerosols [Текст] // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2008: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.289-294.

9. Титов С.С. К вопросу решения обратной задачи оптики аэрозоля в реализации метода спектральной прозрачности [Текст]// Межвузовский сборник «Инновационные технологии: производство, экономика, образование», 2009. С. 261-267

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

Шалунов Андрей Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Шалунова Ксения Викторовна – аспирант кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)435323, e-mail: shkv@bti.secna.ru.

Гольх Роман Николаевич – студент, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.