Ультразвуковая коагуляция при помощи пьезоэлектрической колебательной системы с фокусирующим излучателем в виде ступенчато–переменной по толщине пластины

Владимир Н. Хмелёв, *Senior Member*, IEEE, Антон Н. Галахов, Сергей Н. Цыганок, Андрей Н. Лебедев, *Student Member*, IEEE, Андрей В. Шалунов, Максим В. Хмелёв
Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

***Аннотация* – В статье предлагается новый способ коагуляции частиц при помощи ультразвуковой колебательной системы с излучателем в виде ступенчато–переменной по толщине пластины. Для практического применения предложена методика инженерного расчета излучателей ступенчато переменного типа.**

***Ключевые слова* – Коагуляция, излучатель в виде пластины, УЗКС.**

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с широким распространением потенциально опасных производств, характеризующихся высоким содержанием ядовитых, твердых и жидких веществ в отходящих газах, а также возникающей в ряде случаев необходимостью улавливания ценных материалов из газовой среды, возникает необходимость в разработке эффективных способов коагуляции частиц. Задача значительно усложняется при необходимости улавливания химически активных и агрессивных веществ. В этом случае традиционные средства улавливания аэрозолей оказываются не применимыми.

Возможным решением указанной технологической проблемы является укрупнение и последующее осаждение аэрозольных частиц под действием высокоинтенсивных (более 140 дБ) ультразвуковых колебаний (ультразвуковая коагуляция аэрозолей)[1]. Ультразвуковая (УЗ) коагуляция, обладает рядом неоспоримых преимуществ:

–применимость к агрессивным и взрывоопасным газам;

–возможность работы при высоких температурах и давлениях;

–высокая эффективность и низкая энергоемкость процесса;

–возможность осаждения высокодисперсных аэрозолей и др.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время для коагуляции аэрозолей используются аэродинамические излучатели в виде статических и динамических сирен, пневматических рупоров, электромагнитных громкоговорителей и другие, которые обеспечивают преобразование кинетической энергии газового потока в энергию акустических колебаний.

Недостатками таких излучателей являются:

–низкая эффективность фокусирования ультразвуковых колебаний низкой частоты, создаваемых газоструйными излучателями (диаметр линии фокуса будет превышать несколько длин волн, что для частоты в 10 кГц в воздухе составит около 10 см) не позволяет создать зону повышенной интенсивности излучения (более 170 дБ);

–низкая эффективностью [2], используемых для реализации способа коагуляции газоструйных излучателей гартмановского типа (коэффициент полезного действия менее 20…25%);

–ограниченный диапазон частот излучения (менее 20 кГц), исключающим возможность эффективной коагуляции мелких частиц, так как известно [3], что эффективность коагуляции в значительной степени зависит от степени увлечения дисперсных частиц дисперсионной средой, которая определяется как:

$$F_0 = \frac{3\mu}{2\pi\rho R^2},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды, ρ – плотность дисперсной фазы/частиц, R – радиус частицы.

Недостатки ограничивают возможности ультразвуковой коагуляции при промышленном применении и обуславливают необходимость создания новых способов, основанных на применении

более эффективных излучателей высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний.

III. ТЕОРИЯ

Эффективной альтернативой аэродинамическим излучателям могут служить пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы. Однако требующиеся для осуществления процесса коагуляции ультразвуковое воздействие с интенсивностью более 130…140 дБ невозможно обеспечить классическими пьезоэлектрическими ультразвуковыми колебательными системами, генерирующими продольные акустические колебания. [4]

Поэтому, в основу аппарата, предназначенного для эффективной коагуляции аэрозолей в замкнутых и на открытых пространствах, положены излучатели, обеспечивающие преобразование энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых пластин. Преимуществами излучателей в виде прямоугольных, ступенчато–переменных по толщине пластин являются:

–возможность формирования ультразвуковых колебаний большой мощности;

–обеспечение фокуса излучения в виде вращающейся перпендикулярно оси трубопровода линии, длина которой соответствует поперечному размеру трубопровода;

–осуществление одновременной фокусировки колебаний, создаваемых обеими сторонами прямоугольной пластины, причем колебания, создаваемые обратной к потоку частиц стороной излучателя, направляют на него после отражения и прохождения расстояния, превосходящего продольный размер излучателя на величину, кратную половине длины волны излучаемых УЗ колебаний в воздухе.

III. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ВИДЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН

Основная сложность при создании практических конструкций излучателей в виде прямоугольной, ступенчато–переменной по толщине пластины заключается в отсутствии методики их расчета. К сожалению, аналитическими зависимостями удается описать поведение и определить собственные частоты только пластин постоянной толщины. Пластины постоянной толщины обладают одним существенным недостатком, практически исключающим их применение: увеличение частоты вынужденных колебаний приводит к появлению большого числа «паразитных» мод колебаний, что снижает КПД излучателя практически до нуля.

Использование ступенчато-переменных излучателей позволяет избежать «паразитных» мод. Но, как уже упоминалось ранее, расчет аналитическими методами таких излучателей практически не возможен.

Предложенный и разработанный авторами метод инженерного расчета дискового ступенчато-переменного излучателя реализуется следующим образом:

1. Необходимая длина излучателя (***L₁***) и его резонансная частота (***f***) определяются исходя из требований технологического процесса (выбирается рабочая частота для коагуляции с максимальной эффективностью частиц определенного размера).
2. Исходя из условий оптимальной пропорции размеров сторон пластины (1/3), находится меньшая сторона излучателя (***L₂***).
3. Задается номер гармоники (***n***) на которой будет работать излучатель (как правило, излучатель работает на 3-ей или 5-ой гармонике). Исходя из условия резонанса получаем выражение:

$$L=n\lambda \qquad (1),$$

где λ — длинна волны изгибных колебаний

4. Для известной частоты и длины рассчитывается толщина плоской пластины, так называемая «базовая» толщина. Из скорости распространения изгибных колебаний (2) [5]

$$c=\sqrt{2\pi fh}\cdot\sqrt[4]{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}, \qquad (2)$$

где c — скорость изгибных колебаний, f — резонансная частота излучателя, h — толщина диска, E — модуль Юнга, ρ — плотность, μ — коэффициент Пуассона.

и выражения (1) находим «базовую» толщину пластины:

$$h=\frac{L^2 f}{2\pi n^2}\cdot\sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E}}, \qquad (3)$$

5. Строятся фазовыравнивающие бороздки.
6. Последовательным изменением толщины бороздок добиваются получения ступенчато-переменной по ширине пластины. При этом необходимо соблюдать следующие условия:

- Все фазовыравнивающие бороздки находятся в резонансе с одной из мод базового диска.
- Центральный участок пластины имеет максимальную толщину.
- Крайние участки имеют минимальную толщину.
- Минимальная толщина фазовыравнивающей бороздки должна составлять не менее 0,6 от «базовой» толщины.

- Толщина фазовыравнивающей бороздки может превышать «базовую» толщину не более чем в 2 раза.
- Разница между разными толщинами должна быть не менее 2-3 миллиметров в зависимости от «базовой» толщины.
- Обязательным условием является обеспечение равенства суммы моментов инерции центральной фазовыравнивающей бороздки и всех ***n*** бороздок, моменту инерции «базовой» пластины.

Следует отметить, что ступенчато-переменная форма пластины позволяет избавиться не только от паразитных гармоник, но и позволяет увеличить амплитуду колебаний на краю излучателя.

Разработанный, ступенчато–переменный по толщине излучатель в виде пластины размерами 250*70 (Рис. 1), работает на 5-ти гармониках, частоты которых представлены в Табл. 1.

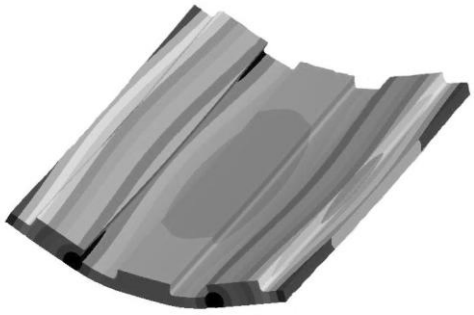


Рис. 1 – Первая мода колебаний излучателя в виде пластины (1598,7 Гц)

Оптимальным диапазоном излучения для коагуляции является использование колебаний с частотой от 15 до 50 кГц. Более низкие частоты опасны для человеческого организма, а на высоких частотах сложно получить акустические колебания высокой интенсивности.

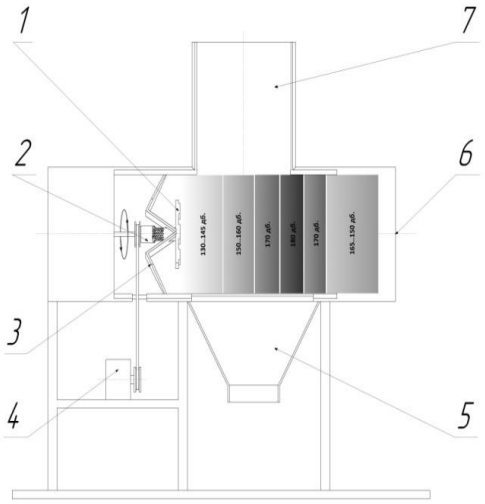
ТАБЛИЦА I
ЧАСТОТЫ ПЕРВЫХ 5-ТИ ГАРМОНИК ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ВИДЕ ПЛАСТИНЫ

Номер гармоники	Частота, Гц
1	1598,7
2	10352
3	20798
4	29336
5	41233

V. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ КОАГУЛЯЦИИ ЧАСТИЦ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Принцип работы системы для коагуляции частиц в газовых потоках заключается в воздействии на частицы упругими колебаниями, фокусируемыми во вращающуюся перпендикулярно оси трубопровода линию, длина которой соответствует поперечному размеру трубопровода. Упругие колебания создают, питаемым электронным генератором, продольно колеблющимся и вращающимся вдоль акустической оси пьезоэлектрическим преобразователем. Излучают и фокусируют упругие колебания механически и акустически связанным с преобразователем излучателем в виде прямоугольной, ступенчато переменной по толщине пластины, совершающей изгибные колебания относительно большей из его осей на частотах, кратных основной, в диапазоне от 30 до 20 кГц. Фокусировка колебаний осуществляется одновременно обеими сторонами прямоугольной пластины, причем колебания, создаваемые обратной к потоку частиц стороной излучателя, направляют на него после отражения и прохождения расстояния, превосходящего продольный размер излучателя на величину, кратную половине длины волны излучаемых УЗ колебаний в воздухе.

Конструкция такой системы представлена на Рис. 2.



1 – излучатель, 2 – УЗКС, 3 – отражатель, 4 электродвигатель, 5 – емкость для сбора частиц; 6 – труба подачи газового потока; 7 – выходная труба.
Рис. 2 – Система коагуляции частиц в газовых потоках.

Предлагаемая система ультразвуковой коагуляции работает следующим образом. Включается электродвигатель 4 и ультразвуковой генератор (на Рис. 2 не показан). При этом излучатель 1 вместе с пьезоэлектрическим преобразователем 2, при помощи передачи и шкива, начинает вращаться вокруг собственной оси с угловой скоростью, зависящей от скорости потока. Акустические колебания, излучаемые пластиной, формируются в фокусе, представляющем собой вращающуюся перпендикулярно оси трубопровода

линию, длина которой соответствует поперечному размеру трубопровода. Воздействие на взвешенные инородные частицы в процессе коагуляции осуществляется одновременно колебаниями, создаваемыми обеими сторонами плоского излучателя, причем колебания, создаваемые обратной к потоку частиц стороной излучателя, направляют на него после отражения и прохождения расстояния, превосходящего продольный размер излучателя на величину, кратную половине длины волны излучаемых УЗ колебаний в воздухе.

Таким образом, обеспечивается равномерность акустического (ультразвукового) воздействия по всему диаметру трубопровода с излучающей поверхности, превосходящей площадь непосредственно излучателя как минимум вдвое.

Разработанный излучатель имеет следующие технические характеристики: для формирования и фокусирования акустических колебаний в трубопроводе диаметром 500 мм использован излучатель в виде изгибно-колеблющейся пластины размером 250х70 мм; совершая колебания на 3-ей и 5-ой модах в частотном диапазоне от 20 до 30 кГц излучатель обеспечивает на фокусном расстоянии 0,5 м формирование ультразвуковых колебаний с интенсивностью более 180 дБ; материал излучателя и концентратора – титановый сплав; размер отражателя 500×140 мм; материал отражателя – металл.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных работ:

1. Показана необходимость использования излучателей в виде ступенчато–переменных по толщине пластин, совершающих изгибные колебания для повышения эффективности коагуляции частиц в газовых потоках.

2. Предложена и разработана методика проектирования излучателей в виде ступенчато–переменных по толщине пластин, совершающих изгибные колебания на частотах в диапазоне 30…20 кГц и позволяющих фокусировать УЗ колебания в линию и обеспечивать интенсивность излучения в фокусе не менее 180 дБ.

3. Предложен способ коагуляции частиц в газовых потоках, который может найти применение в системах очистки промышленных выбросов, выделяющихся в процессе производств, в различных отраслях (горнометаллургическая, химическая, теплоэнергетическая, пищевая) промышленности.

VI. БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Хмелев В.Н.. Ультразвуковая коагуляционная камера для работы в агрессивных средах [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К. В. Шалунова // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр./науч.ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафонов; отв. за вып.: А.А. Левицкий. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009.– 465 с.

[2] Источники мощного ультразвука [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1967. – 265 с.

[3] Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус; пер. с англ. изд. Ю.А. Косого - М.: Химия, 1981. - 616 с.

[4] Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media [Text] / A.N. Lebedev; A.V. Shalunov; S.S. Khmelev; N.V. Kuchin; A.V. Shalunova //International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008.

[5] Ландау Л.Д. Теоретическая физика [Текст] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., том VII, Теория упругости - М.: Наука, 1987. - 248 с.