

УДК 66.074.2:66.084.08

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ КОАГУЛЯЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ

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

В статье представлены результаты исследования процесса акустической коагуляции, включающего теоретический анализ процесса и экспериментальные исследования его эффективности. Полученные результаты позволили установить, что для мелкодисперсных аэрозолей необходим учет вязкости газовой среды, обуславливающий повышение оптимальной частоты воздействия до ультразвукового диапазона (более 20 кГц) при уровне звукового давления не менее 130 дБ. Показано, что практическое применение созданного оборудования, обеспечивающего ультразвуковое воздействие на частоте 27 кГц с уровнем звукового давления до 150 дБ, позволяет сократить время разрушения дыма до 10 раз, жидкостного аэрозоля до 11,5 раз.

Ключевые слова: акустическое воздействие, аэрозоль, коагуляция

Введение

Крупные промышленные предприятия выбрасывают в атмосферу огромное количество газов, несущих разнообразные, в основном опасные для окружающей среды примеси. Эти примеси представлены в виде твердых частиц, капелек жидкости, а также вредных газообразных продуктов. Основными поставщиками вредных и токсичных примесей в атмосферу являются химическая промышленность, цветная металлургия, в том числе производство алюминия, производства по переработке свинцово-цинковых, медных, сульфидных руд и др.

Твердые примеси в промышленных газах находятся в виде пыли или дыма. Попадая в окружающую среду, они засоряют воздух, вредно действуют на организм человека, растительность, загрязняют почву. Жидкие примеси присутствуют в промышленных газах в виде брызг или туманов (характерным примером являются газы химических предприятий по производству различных кислот). Выброс в атмосферу таких примесей влечёт за собой гибель растительности в окружающей местности.

Повышенная опасность аэрозолей техногенного происхождения связана, прежде всего, с их мелкодисперсностью. В большинстве случаев, размер частиц таких аэрозолей не превышает 5 мкм. Это обуславливает способность аэрозолей проникать в лимфатические узлы, кровяную систему, задерживаться в легких, засорять слизистые оболочки, являясь причиной многих заболеваний и нанося тем самым, непоправимый ущерб здоровью человека.

Поэтому, удаление мелких частиц (размером менее 5 мкм) из промышленных газов, в настоящее время является одной из самых важных задач в области борьбы с загрязнением воздуха. Для очистки промышленных газов от дисперсных примесей ис-

пользуют широкий класс газоочистного оборудования (циклоны, фильтры, пылеуловители, осадительные камеры), которое способно эффективно улавливать (степень очистки не менее 80%) лишь частицы с размером более 5 мкм.

Одним из перспективных путей решения проблемы повышения эффективности очистки промышленных газов от мелкодисперсных частиц является их укрупнение посредством акустического воздействия – акустическая коагуляция. Преимуществами акустической коагуляции являются: способность коагулировать аэрозоли различной дисперсности; применимость к взрывоопасным и агрессивным газам; возможность работы при высоких температурах и давлениях; возможность создания компактного оборудования.

К сожалению, все преимущества акустической коагуляции до настоящего времени практически не реализованы. Основной причиной этого является отсутствие понимания особенностей реализации процесса, что не позволяет осуществлять выбор оптимальных режимов и условий акустического воздействия на различные аэрозоли. Отсутствие необходимых знаний о протекающем процессе не позволяет сформулировать требования и создать специализированное оборудование, способное осуществлять процессы коагуляции с максимальной эффективностью.

В связи с этим, возникает необходимость в комплексном изучении процесса акустической коагуляции, заключающемся в проведении теоретического анализа процесса, с целью выявления оптимальных режимов и условий акустического воздействия, и разработке оборудования, подтверждающего эффективность коагуляции.

Теоретический анализ процесса акустической коагуляции

Проведенные ранее экспериментальные исследования были направлены на определение эффективности коагуляции при помощи акустических колебаний низкочастотного диапазона (до 10 кГц). Анализ имеющихся данных [1,2,3] показывает, что для осаждения крупнодисперсного аэрозоля с частицами размером более 15 мкм хороший результата может быть получен при низких частотах (от 2 до 10 кГц). Эти же режимы, при обработке более мелкодисперсного аэрозоля, представляющего наибольший интерес в практике пылеулавливания, не столь результативны [1]. Попытки поиска теоретического объяснения полученным экспериментальным данным оказались успешными лишь в области низких частот, подтвердив тот факт, что для акустической коагуляции крупнодисперсного аэрозоля достаточно частоты воздействия в несколько кГц.

При этом, попытки теоретического поиска зависимости эффективности процесса коагуляции от частоты воздействия в области высоких частот были обречены на провал. Это было связано с тем, что построение моделей процесса и теоретический анализ проводились без учета вязкости газовой среды, которая при низких частотах не существенна, а при высоких частотах начинает оказывать существенное влияние на процесс коагуляции частиц. Таким образом, пренебрежение вязкостью газа приводит к существенному занижению частотного диапазона, оптимального для воздействия на мелкодисперсный аэрозоль.

Поэтому возникает необходимость в комплексном изучении процесса акустической коагуляции, заключающемся в проведении теоретического анализа процесса, с целью выявления оптимальных режимов воздействия (частотного диапазона и уровня звукового давления) и экспериментального исследования для подтверждения выявленных режимов.

Для исследования процесса коагуляции аэрозолей при воздействии высокочастотными УЗ колебаниями и выявления оптимальных режимов акустического воздействия была разработана модель процесса, учитывающая вязкость газа. Для построения модели использован подход, аналогичный предложенному в работе [4]. При построении модели процесса акустической коагуляции на макроscopicком уровне предположено, что кинетика коагуляции протекает таким образом, что она может быть описана уравнением Смолуховского (1):

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i n_{k-i} - n_k \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_i, \quad (1)$$

где n_k – концентрация k-мер в каждый момент времени, $\beta_{i,k}$ – ядро коагуляции, характеризующее интенсивность столкновения i-мер и k-мер.

Недостатком предлагаемой модели является то, что при нахождении компоненты вероятности парного столкновения частиц определённых размеров, обусловленной их взаимодействием, авторами принималось допущение об отсутствии вязкости газа. Однако известно, что при малых размерах частиц аэрозоля, вязкость газа оказывается очень существенной в силу малости числа Рейнольдса.

Таким образом, отличительной особенностью подхода при разработке новой модели процесс коагуляции, в отличие от подхода, рассмотренного в работе [4] является возможность учета влияния вязкости на вероятность парного столкновения частиц:

$$\beta_{Hi,j} = \frac{(a_i + a_j)^2}{3\mu} \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_j} \right) \int_0^{\pi} h(f_{21}) f_{21} \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

где a_i, a_j – радиус i-меры и j-меры соответственно;

μ – вязкость несущей (газовой) фазы;

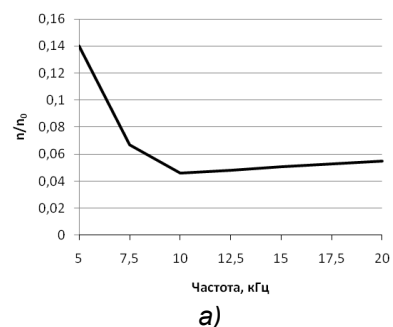
θ – угол между волновым вектором акустической волны и линией центров частиц.

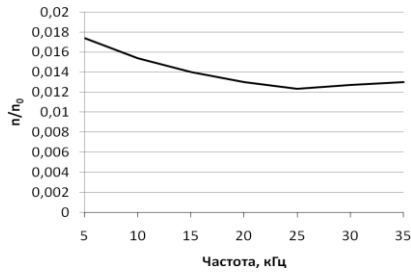
$$h(f_{21}) = \begin{cases} h(f_{21}) = 1, & \text{если } f_{21} \geq 0 \\ h(f_{21}) = 0, & \text{если } f_{21} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где f_{21} – сила взаимодействия частиц,

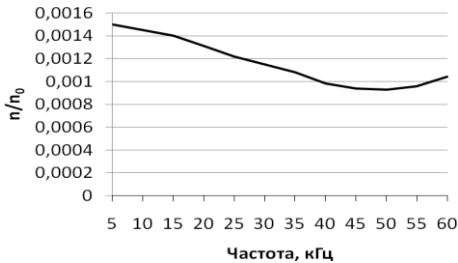
Анализ построенной модели позволил получить необходимые зависимости между эффективностью коагуляции и параметрами акустического воздействия.

Так на рисунке 1 приведены зависимости эффективности коагуляции от частоты для аэрозолей с различными размерами частиц при средней концентрации частиц $6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Расчёты проводились при постоянном уровне звукового давления, равном 133 дБ. Эффективность коагуляции определялась как значение отношения концентрации частиц n через 30 с с момента начала процесса коагуляции к начальной n_0 .





б)



в)

а – размер частиц 9 мкм; б – размер частиц 5 мкм; в – размер частиц 1 мкм
Рисунок 1 – Зависимость изменения концентрации от частоты воздействия для аэрозолей с различными размерами частиц

Для получения полной картины влияния частоты ультразвукового воздействия на процесс коагуляции была построена зависимость оптимальной частоты от радиуса аэрозольных частиц, представлена на рисунке 2.

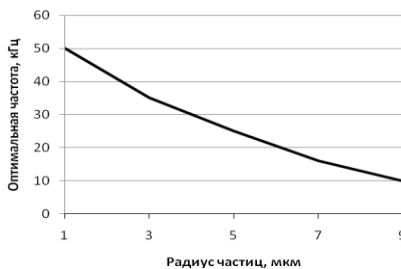


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной частоты от радиуса аэрозольных частиц

Анализ представленной зависимости еще раз подтверждает тот факт, что с увеличением дисперсности аэрозоля оптимальная частота воздействия, при которой процесс коагуляции происходит наиболее эффективно, должна повышаться. Кроме того, анализ полученной зависимости оптимальной частоты от размера частиц позволяет сделать вывод о применимости разработанной модели процесса коагуляции (с учетом вязкости газа) как для области низких частот, так и для области высоких частот.

Обобщение представленных на рисунках 1 и 2 зависимостей, позволяет установить, что оптимальная частота коагуляции для аэрозолей с размерами частиц менее 5 мкм лежит в области ультразвуковых частот, и возрастает с уменьшением размера частиц аэрозолей. При размерах аэрозольных частиц более 9 мкм оптимальная частота лежит в пределах слышимого диапазона (рисунок 1а). Однако, как показывает зависимость, приведённая на рисунке 1а, применение для коагуляции аэрозоля с размером частиц 9 мкм частот акустических колебаний, от 15 до

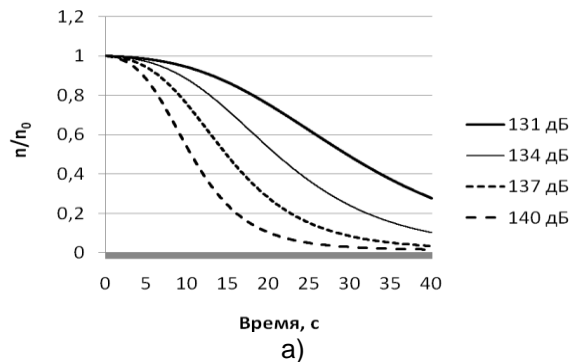
20 кГц и выше, вызывает незначительную потерю эффективности коагуляции.

Таким образом, для обеспечения высокой степени очистки как мелкодисперсного, так и грубодисперсного аэрозоля необходимо применение акустического воздействия в области высоких частот. При этом, обеспечивается высокая эффективность коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 5 мкм) и незначительное снижение эффективности коагуляции грубодисперсных аэрозолей (10 мкм и более).

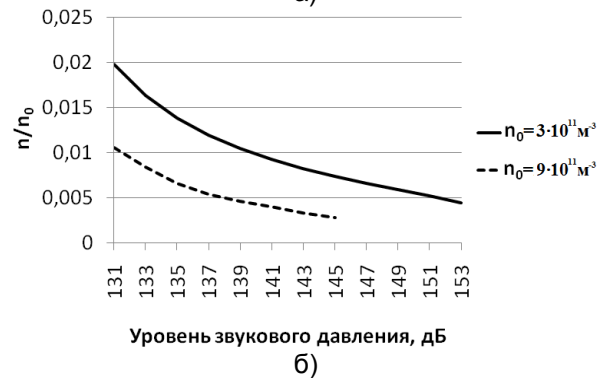
На следующем рисунке приведены зависимости изменения концентрации аэрозоля от уровня звукового давления, характеризующие эффективность процесса коагуляции.

На рисунке 3а приведены зависимости изменения концентрации аэрозоля от времени УЗ воздействия. Ультразвуковое воздействие осуществлялось с частотой 25 кГц, начальная концентрация аэрозоля была равна 10^{12} м^{-3} , размер частиц аэрозоля достигал 5 мкм.

На рисунке 3б показаны зависимости изменения отношения концентрации аэрозольных частиц к начальной n/n_0 от уровня звукового давления. Условия проведения эксперимента: частота колебаний 20 кГц; время – 15 с с момента начала процесса; радиус частиц – 3 мкм.



а)



б)

Рисунок 3 – Зависимость концентрации аэрозоля от времени (а) и от уровня звукового давления (б)

Анализ приведенных зависимостей (рисунок 3) подтверждает рост скорости коагуляции при увеличении уровня звукового давления. Так, повышение уровня звукового давления с 130 до 140 дБ позволяет сократить время коагуляции более чем в 3 раза. Кроме того, зависимости на рисунке 3б подтверждают факт, что коагуляция аэрозолей под действием акустических колебаний происходит

более интенсивно при высоких концентрациях аэрозоля.

Требования к используемому оборудованию

Проведенный теоретический анализ процесса акустической коагуляции позволил выявить оптимальные параметры ультразвукового воздействия на аэрозоли:

- частота излучения не менее 20 кГц;
- формируемый уровень звукового давления не менее 130 дБ.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости применения специальных ультразвуковых высокоинтенсивных излучателей.

Однако используемые в современной практике аэродинамические излучатели не способны генерировать акустические колебания с высоким уровнем звукового давления (более 130 дБ) на высоких частотах (более 20 кГц). В связи с этим, использование таких излучателей для коагуляции мелкодисперсных аэрозолей является не возможным, в силу не способности обеспечить оптимальные режимы ультразвукового воздействия.

Возможной альтернативой устаревшим аэродинамическим излучателям могут служить дисковые пьезоэлектрические излучатели (ультразвуковые колебательные системы) [5], разработанные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института.

На рисунке 4 приведена фотография одного таких излучателей, способного реализовать выявленные режимы воздействия.



Рисунок 4 – Фотография ультразвуковой колебательной системы с дисковым излучателем

Для увеличения площади излучающей поверхности (использования излучения обратной стороны диска) и возможности вращения излучатель может быть снабжен отражателем специальной формы и установлен на подвижной поворотной платформе.

Экспериментальные исследования эффективности ультразвуковой коагуляции

Для подтверждения теоретически выявленных режимов ультразвукового воздействия были проведены эксперименты по исследованию эффективности процесса коагуляции аэрозоля. В

связи с тем, что аэрозоль промышленного происхождения содержит примеси либо с твердой дисперсной фазой (дым, пыль) либо с жидкой дисперсной фазой (туман, брызги), все исследования эффективности ультразвуковой коагуляции были разделены на две стадии:

- исследования эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей с твердой дисперсной фазой;
- исследование эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей с жидкой дисперсной фазой.

Для проведения исследований эффективности ультразвуковой коагуляции была разработана лабораторная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять регистрацию изменения плотности и дисперсного состава аэрозоля в процессе его разрушения.

Лабораторная установка для исследования процесса ультразвуковой коагуляции конструктивно состоит из аэрозольной камеры (объем 250 м³). В состав установки включено оборудование для ультразвукового воздействия, источники для создания аэрозоля, измерительное оборудование и вспомогательное оборудование. Измерительное и вспомогательное оборудование включает в себя: микрофон шумомера для измерения уровня звукового давления; оптические датчики, для получения количественных характеристик ультразвукового воздействия; вентилятор для равномерности распределения аэрозоля в камере.

Для проведения экспериментальных исследований было использовано 4 излучателя, отличающихся диаметром дискового излучателя и мощностью создаваемых ультразвуковых колебаний. Технические характеристики излучателей (в сборе с электронными генераторами) приведены в таблице 1.

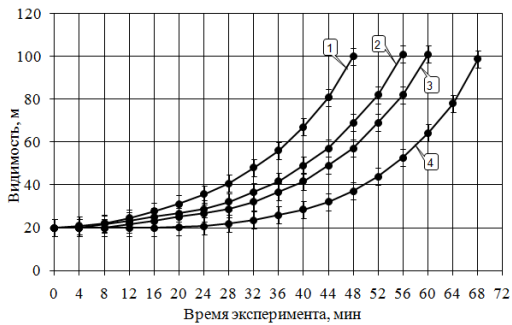
На первой стадии исследования были направлены на определение эффективности коагуляции аэрозоля с твердой дисперсной фазой. В качестве меры эффективности ультразвукового воздействия оценивалось время установления требуемой дальности видимости (100 м). Определение дальности видимости осуществлялось путем измерения коэффициента ослабления излучения лазера длиной волны 0,63 мкм по методике, описанной в [6].

Таблица 1 – Технические характеристики созданных излучателей

Наименование параметра	Значение
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Диаметр диска излучателя, мм	250; 320; 360; 420
Максимальная потребляемая мощность, не более ВА	270; 270; 400; 600
Диапазон регулирования мощности излучения, %	10-100
Уровень звукового давления на расстоянии 1 м, дБ, не менее	140; 144; 146; 150

нее	
Частота механических колебаний, кГц	27±2,0

При проведении эксперимента камера наполнялась дымом до достижения начальной видимости, не более 20 м. Далее осуществлялся отбор проб: через каждые 15 минут для случая естественного осаждения дыма и каждые 4 минуты при воздействии акустическими колебаниями. Результаты исследований представлены на рисунке 5.



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

Рисунок 5 – Зависимость изменения дальности видимости в камере от времени в процессе акустического воздействия

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 увеличение дальности видимости с 20 до 100 м в аэрозольной камере в результате ультразвукового воздействия, составил 48 мин. При этом время естественного увеличения видимости до 100 м составляет 8 часов. Таким образом, использование ультразвукового аппарата с потребляемой мощностью 600 Вт позволяет сократить время достижения требуемого значения видимости до 10 раз. При использовании самого маломощного излучателя диаметром 250 мм, время разрушения аэрозоля сократилось в 7,5 раз. Очевидно, что увеличение мощности излучения обеспечит существенное сокращение времени коагуляции.

На втором этапе экспериментальные исследования были направлены на определение эффективности процесса ультразвуковой коагуляции аэрозоля с жидкой дисперсной фазой.

Мелкодисперсный жидкостный аэрозоль создавался при помощи ультразвуковых ингаляторов, которые обеспечивают создание воздушно-капельной дисперсии со средним диаметром капель 3...5 мкм.

Все экспериментальные исследования по коагуляции жидкостного аэрозоля были разделены на две стадии:

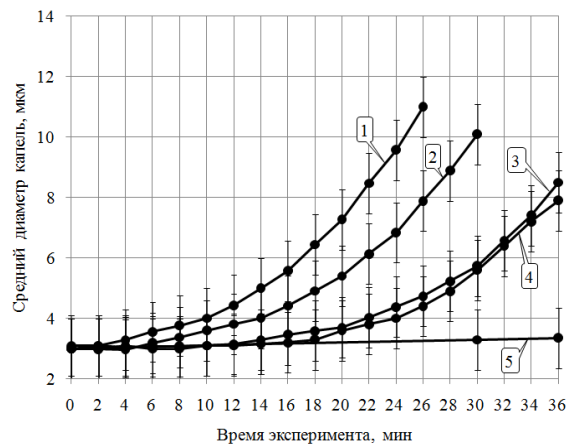
1. Исследование эволюции дисперсного состава аэрозоля в аэрозольной камере в процессе акустического воздействия и при естественном осаждении аэрозоля. Дисперсный состав аэрозоля определялся при помощи метода спектральной прозрачности,

реализующей оптический способ определения дисперсности субмикронных частиц [7].

2. Определение дальности видимости в аэрозольной камере в процессе ультразвукового воздействия и без него.

На первой стадии проводилось исследование эволюции дисперсного состава аэрозоля в камере в процессе акустического воздействия и при естественном осаждении аэрозоля. Для этой цели аэрозольная камера заполнялась жидкостным аэрозолем. За начало эксперимента был принят момент достижения начальной видимости не более 20 м. Эксперимент проводился в течение времени, за которое видимость в аэрозольной камере увеличивалась с 20 м до 100 м. На рисунке 6 представлены зависимости, характеризующие изменение среднего диаметра частиц тумана в процессе коагуляции.

Как и следовало ожидать, при осуществлении акустического воздействия происходит увеличение среднего диаметра капель аэрозоля за счет их коагуляции. Этот процесс происходит тем быстрее, чем больше диаметр излучателя акустических колебаний и выше создаваемый им уровень звукового давления. При этом в контрольном эксперименте, без акустического воздействия, за максимальное время проведения эксперимента (36 минут) эволюции дисперсного состава практически не происходило.



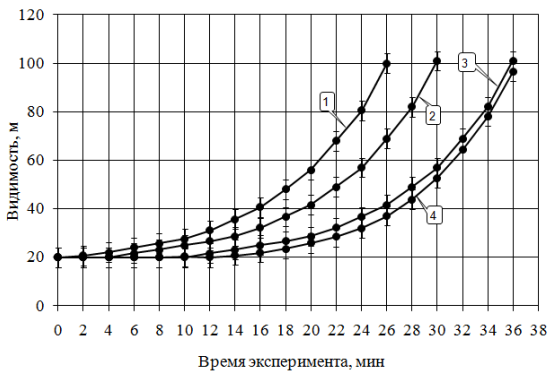
1 – воздействие излучателем диаметром 420 мм; 2 – воздействие излучателем диаметром 360 мм; 3 – воздействие излучателем диаметром 320 мм; 4 – воздействие излучателем диаметром 250 мм; 5 – без акустического воздействия

Рисунок 6 – Зависимость изменения среднего диаметра воздушно-капельной дисперсии в процессе ее распада

Следующей стадией экспериментов являлось определение дальности видимости в аэрозольной камере в процессе ультразвукового воздействия на жидкостный аэрозоль. Первоначально было определено контрольное время увеличения дальности видимости с 20 до 100 м в процессе естественного разрушения жидкостного аэрозоля. Измерения проводились каждые 15 минут. Было установлено, что время увеличения видимости до 100 м составляет 5 часов.

На рисунке 7 представлены графики изменения видимости в аэрозольной камере в процессе ультразвукового воздействия излучателями различного диаметра.

Как и в случае с коагуляцией дыма, наблюдается сокращение времени коагуляции в зависимости от диаметра используемого излучателя и уровня звукового давления генерируемых колебаний. Минимальный промежуток времени, за который произошло увеличение дальности видимости с 20 до 100 м в аэрозольной камере в результате ультразвукового воздействия, составил 26 мин. При этом время естественного увеличения видимости до 100 м составляло 5 часов. Таким образом, наложение ультразвуковых колебаний позволяет сократить время достижения требуемого значения видимости до 11,5 раз. При использовании самого маломощного излучателя диаметром 250 мм, время разрушения тумана сократилось в 8,3 раза.



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

Рисунок 7 – Зависимость изменения дальности видимости в камере от времени в процессе акустического воздействия

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 5, 7 позволяет сделать вывод о том, что применение больших по диаметру и мощности ультразвуковых излучателей или использование нескольких излучателей позволит еще более значительно сократить временные промежутки, необходимые для достижения требуемого значения видимости.

Для подтверждения сделанного вывода была произведена оценка удельной электрической мощности, затрачиваемой на разрушение аэрозоля в 1 м³. Измерения проводились в процессе работы ультразвукового генератора на максимальной мощности. Расчет удельной мощности УЗ аппарата осуществлялся с использованием следующего выражения:

$$P_{уд.} = \frac{P_{эл}}{V_{ак}}, \quad (4)$$

где $P_{эл}$ – мощность, потребляемая УЗ аппаратом, Вт; $V_{ак}$ – объем аэрозольной камеры, м³, равный 250 м³.

В таблице 2 представлены результаты исследования.

Таблица 2 – Мощностные характеристики акустических излучателей разного диаметра при коагуляции жидкостного аэрозоля

Название излучателя	Потребляемая мощность, Вт	Удельная мощность, Вт/м ³
Излучатель диаметром 250 мм	270	1,08
Излучатель диаметром 320 мм	270	1,08
Излучатель диаметром 360 мм	400	1,6
Излучатель диаметром 420 мм	600	2,4

Из полученных результатов следует, что самым выгодным, по соотношению энергетические затраты/время воздействия является дисковый излучатель диаметром 320 мм. Однако следует учитывать, что полученные оценки справедливы только для небольших объемов аэрозоля (250 м³). При необходимости применения излучателей для осаждения больших объемом, наиболее целесообразно использовать излучатель диаметром 420 мм и более, т.к. он обладает достаточным запасом мощности.

Заключение

Таким образом, в результате проведенного комплексного исследования процесса ультразвуковой коагуляции, включающего в себя теоретический анализ процесса и экспериментальные исследования эффективности акустической коагуляции, было установлено:

- оптимальные условия коагуляции мелкодисперсных аэрозолей обеспечиваются акустическим воздействием при частоте более 20 кГц при уровне звукового давления более 130 дБ;
- применение созданного оборудования, обеспечивающего ультразвуковое воздействие на частоте 27 кГц с уровнем звукового давления до 150 дБ, позволяет сократить время разрушения дыма до 10 раз, жидкостного аэрозоля до 11,5 раз.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, г/к № П2518.

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. Sheng, C. Modelling of acoustic agglomeration processes using the direct simulation Monte Carlo method [Текст] / Changdong Sheng, Xianglin Shen. // Journal of Aerosol Science, Volume 37. – 2006. – January (Issue 1). – P. 16-36.
5. 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
6. Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст] / Х. Грин; пер. с англ. изд. Н.А. Фукса. – Л.: Химия, 1972. – 428 с
7. 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

Д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе [Хмельёв В.Н.](#), тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ;

к.т.н., доцент, доцент [Шалунов А.В.](#) тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ;
аспирант [Шалунова К.В.](#) тел. (3854) 435323, e-mail: shkv@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ;

студент [Голых Р.Н.](#) тел. (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ.