

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ

[Хмелев В.Н.](#), [Шалунов А.В.](#), [Шалунова К.В.](#)

*Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова
659305, Бийск, ул. Трофимова, 27*

Очистка отходящих газов от нежелательных аэрозольных примесей уже давно стала сложной промышленной проблемой. Это связано развитием тепловой энергетики, химического, пищевого, биохимического производства и других новых отраслей промышленности, в которых даже весьма низкие концентрации взрывоопасных и токсичных аэрозолей представляют серьезную опасность.

В промышленности задача улавливания производственных аэрозолей решается при помощи осадительных камер, пылеулавливателей, различных циклонов и фильтров. Однако, выше перечисленным устройствам присущ существенный недостаток, связанный с низкой эффективностью, а иногда и невозможностью, улавливания взрывоопасных аэрозолей. Возможным выходом из создавшейся технологической проблемы является предварительная коагуляция аэрозолей ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

Ультразвуковая коагуляция обладает следующими преимуществами по сравнению с существующими способами (тепловая, гравитационная, в электрическом поле) [1] :

- применимость к взрывоопасным и агрессивным газам;
- возможность работы при высоких температурах и давлениях;
- возможность осаждать мелкодисперсные аэрозоли;

Перечисленные преимущества ультразвуковой коагуляции делают ее весьма привлекательной для промышленного использования.

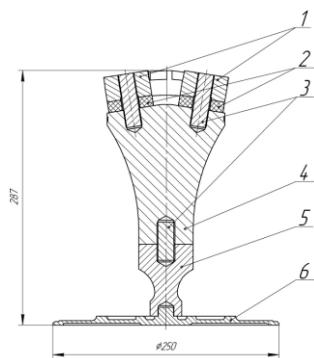
К сожалению, все преимущества ультразвуковой коагуляции остаются фактически не реализованными ввиду отсутствия современных, мощных и экономичных излучателей ультразвуковых колебаний в газовой среде. Используемые в производственной практике газоструйные излучатели обладают рядом существенных недостатков (большой расход сжатого воздуха, низкий КПД, быстрый износ механических узлов), что не позволило вывести ультразвуковую коагуляцию за рамки научных исследований и лабораторных экспериментов.

Эффективной альтернативой газоструйным излучателям могут служить, созданные в последние годы, пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы (УЗКС), в которых обеспечивается преобразование энергии продольных колебаний в изгибные колебания титановых пластин или дисков [2].

Положенная в основу теоретическая разработка авторов [3, 4, 5] была реализована в практической конструкции ультразвуковой колебательной системы, обладающей техническими и эксплуатационными характеристиками, достаточными для реализации процесса коагуляции.

Устройство и внешний вид созданной колебательной системы показаны на рисунке 1.

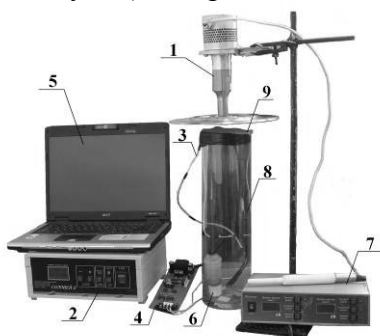
Разработанная система при диаметре дискового излучателя диаметром 0,34 м и потребляемой электрической мощности не более 200 Вт обеспечивает излучение УЗ колебаний с интенсивностью до 150 дБ.



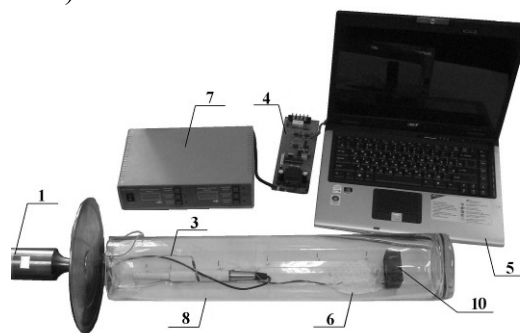
1 – задние отражающие накладки, 2 – пьезоэлектрические элементы, 3 – стягивающие шпильки, 4 – преобразователь, 5 – концентратор, 6 – дисковый излучатель
Рисунок 1 – Схематичный вид УЗКС с двухполуволновым преобразователем

Для подтверждения эффективности коагуляции различных взрывоопасных аэрозолей при помощи созданных дисковых излучателей были разработаны две экспериментальные установки (рисунок 2):

- для коагуляции аэрозоля в ограниченном объеме при отсутствии воздушных потоков (экспериментальная установка №1);
- для коагуляции аэрозоля, распространяющегося по протяженной трубе в потоке воздуха (экспериментальная установка №2).



а)



б)

1 – УЗКС; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – инфракрасная система измерения плотности аэрозоля; 4 – АЦП; 5 – персональный компьютер; 6 – генератор аэрозолей/аэрозоль; 7 – измеритель уровня звукового давления; 8 – технологический объем; 9 – отсекающий воздушных потоков, 10 – вентилятор.

Рисунок 2 – Экспериментальные установки

Каждая установка состоит из колебательной системы 1, предназначенной для ввода колебаний в воздушную среду, генератора электрических колебаний ультразвуковой частоты 2, генератора аэрозолей (порошка для создания аэрозоля) 6, измерителя уровня звукового давления 7 и технологического объема 8 имеющего форму протяженного сосуда с размерами, обеспечивающими режим стоячей волны. В состав установки включена система измерения плотности аэрозоля, состоящая из первичного преобразователя 3, АЦП 4, персонального компьютера 5 и предназначенная для оценки эффективности ультразвуковой коагуляции. В основу ее работы положен оптический метод, базирующийся на явлении поглощения и рассеивания света аэрозолями [4]. Это метод прост и надежен, поскольку в довольно широком интервале оптическая плотность аэрозоля пропорциональна его концентрации.

В целом конструкция обеих установок практически аналогична за исключением того, что во второй установке для создания потока воздуха и аэрозоля используется

вентилятор 10, и отсутствует система отсечения воздушных потоков 9, закрывающая технологический объем.

Для охвата наиболее широкого спектра случаев возможного практического применения ультразвуковой коагуляции при проведении экспериментальных исследований были использованы как жидкостные, так и твердые аэрозоли с различным дисперсным составом. Состав частиц дисперсной фазы и их размер приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Аэрозоли, использованные при проведении экспериментальных исследований

№	Название	Размер частиц, мкм
1	Бензин	3...5
2	Чайная пыль	5...20
3	Тонер для принтера	3...15
4	Сахарная пудра	10...40
5	Мучная пыль	1...5
6	Табачная пыль	4...18

На рисунке 3 приведена серия фотографий процесса коагуляции аэрозоля бензина, генерируемого обычным медицинским ингалятором, помещенным в технологический объем. Параметры УЗ воздействия в этой серии экспериментов: интенсивность УЗ излучения – 130 дБ; частота – 21,5 кГц.

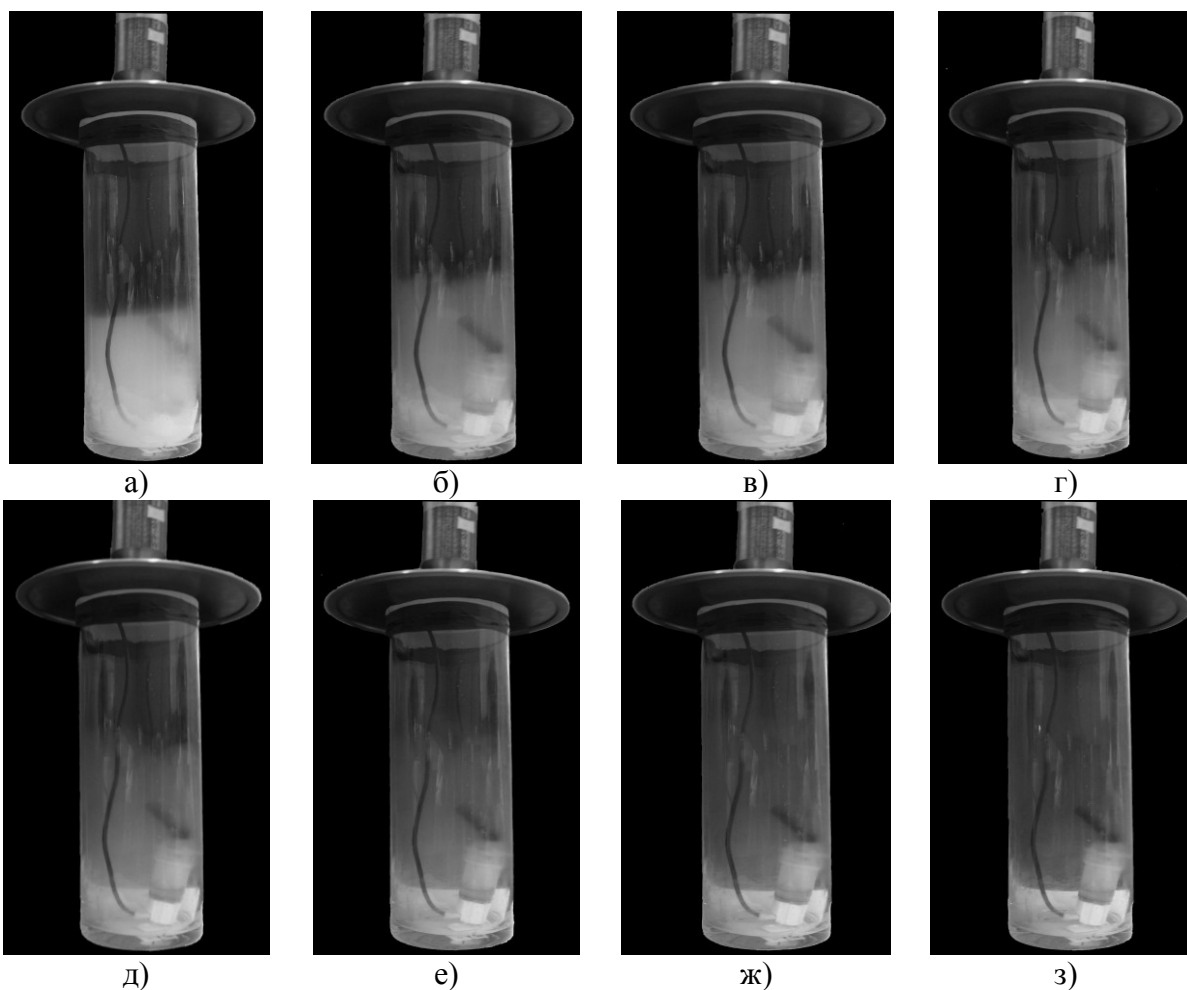


Рисунок 4 – Фотографии, иллюстрирующие динамику процесса коагуляции

Из представленных фотографий следует, что в начале воздействия ультразвуковыми колебаниями происходит возмущение аэрозоля воздушными потоками, возникающими под действием радиационного давления [6]. Одновременно с этим становится заметно некоторое просветление аэрозоля – уменьшение его плотности. Возникающие в процессе коагуляции воздушные потоки играют в этом случае, положительную роль. Они вызывают осаждение коагулированных капель аэрозоля на стенки сосуда.

На фотографии 4 з) показана конечная стадия процесса коагуляции. Стенки технологического объема при этом покрылись капельками коагулированной жидкости. Следует отметить, что при простом перемешивании аэрозоля, как при помощи ультразвуковых колебаний (при уровне звукового давления недостаточным для коагуляции), так и при помощи воздушных потоков генерируемых механическим путем (при помощи вентилятора помещенного в технологический объем) осаждение первичного аэрозоля не наблюдалось.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают наличие факта коагуляции аэрозоля в ультразвуковом поле, формируемом дисковым излучателем. В ходе экспериментов было установлено, что воздействие ультразвуковых колебаний высокой интенсивности (130 дБ и более) приводит не только к коагуляции аэрозоля (т.е. к укрупнению его частиц), но и к его осаждению (т.е. фактически происходит очистка воздушной среды от содержащихся в ней примесей без применения дополнительных устройств).

На рисунке 5 показана зависимость изменения плотности аэрозоля бензина в зависимости от времени УЗ воздействия. Данные по оси ординат нормированы по максимальному значению плотности аэрозоля.

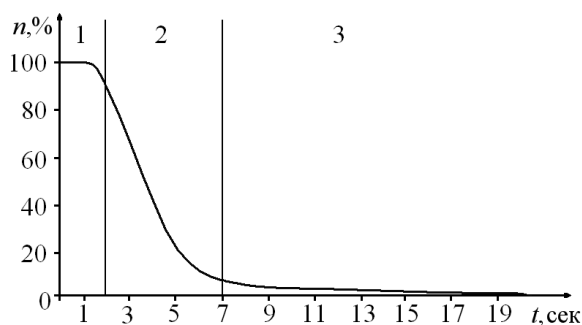


Рисунок 5 – Зависимость изменения плотности аэрозоля от времени УЗ воздействия

Изменение плотности аэрозоля от времени имеет нелинейный характер. На кривой зависимости можно выделить три стадии процесса.

1 стадия. В течение промежутка времени, соответствующего этой стадии процесса, изменение плотности аэрозоля практически не происходит. Это связано с первоначальным увлечением частиц ультразвуковыми колебаниями, которым необходимо некоторое время для того чтобы сблизится на расстояние межмолекулярного взаимодействия для последующей коагуляции.

2 стадия. В течение промежутка времени, соответствующего этой стадии процесса происходит интенсивная коагуляция аэрозоля и осаждение образовавшихся агрегатов.

3 стадия. На этом промежутке времени ультразвукового воздействия происходит постепенное уменьшение скорости изменения концентрации аэрозоля. Это связано с «истощением» аэрозоля, увеличением расстояния между отдельными каплями аэрозоля и, как следствие, уменьшением элементарных актов коагуляции капель аэрозоля.

На основании полученных результатов была определена скорость коагуляции аэрозоля. Её зависимость от времени УЗ воздействия показана на рисунке 6.

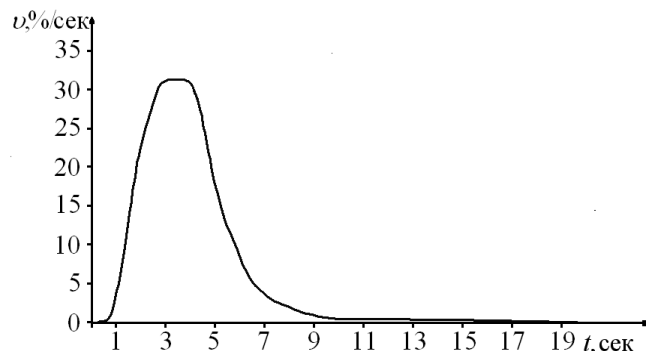
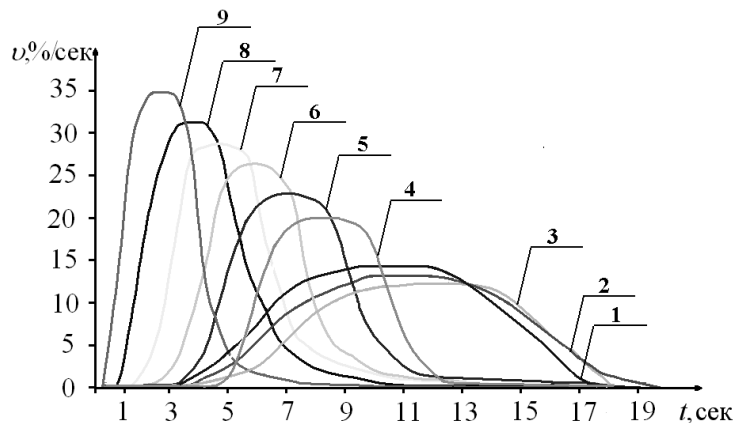


Рисунок 6 – Зависимость скорости коагуляции аэрозоля от времени УЗ воздействия

Из рисунка 6 следует, что зависимость скорости коагуляции имеет экстремальный характер. Причем максимум находится в пределах второй стадии процесса (см. рисунок 5).

Дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на определение зависимости максимума скорости коагуляции от уровня звукового давления. При проведении экспериментов начальная концентрация аэрозоля поддерживалась постоянной, равной $9,4 \text{ мл/м}^3$. Уровень звукового давления, формируемый дисковым излучателем изменялся ступенчато, начиная от 110 дБ с шагом 5 дБ и контролировался специализированным измерителем ультразвукового частотного диапазона [7].

На рисунке 7 представлены результаты проведенных экспериментов.



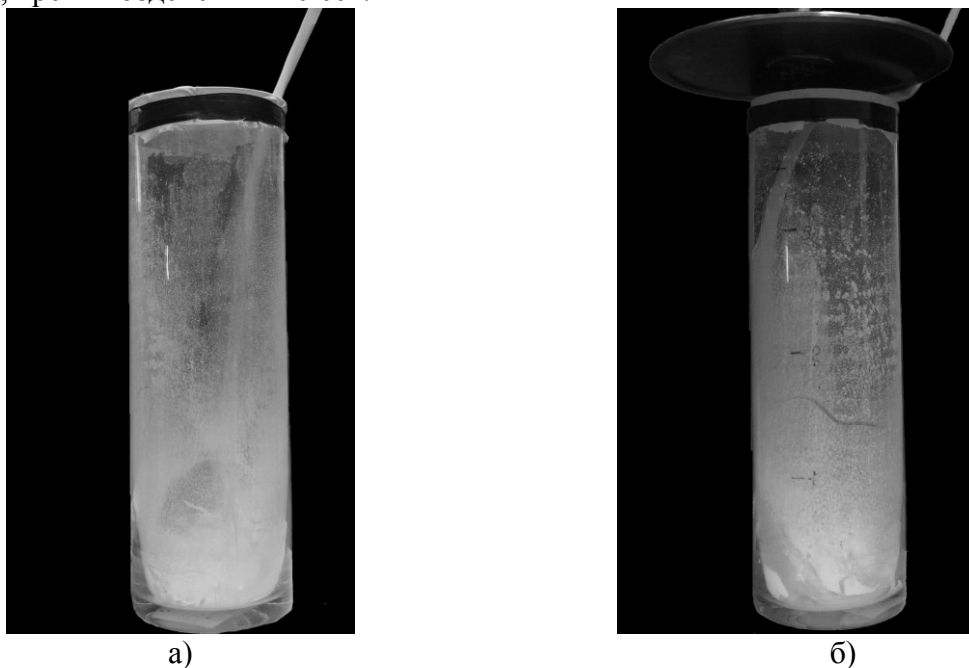
1 – уровень звукового давления 110 дБ; 2 – 115 дБ; 3 – 120 дБ; 4 – 125 дБ; 5 – 130 дБ; 6 – 135 дБ; 7 – 140 дБ; 8 – 145 дБ; 9 – 150 дБ

Рисунок 7 – Зависимость скорости коагуляции от времени для различных интенсивностей УЗ воздействия

Как видно из представленных зависимостей, скорость коагуляции резко возрастает, начиная с уровня УЗ воздействия, соответствующего 125 дБ. При дальнейшем увеличении уровня УЗ воздействия максимальные значения, которых достигает скорость коагуляции, продолжают возрастать, так и не достигая какого либо ограничения или максимального значения. Минимальный промежуток времени, за который происходила коагуляция аэрозоля - 5 сек. При этом время естественного осаждения аэрозоля равнялось 50.60 мин. Таким образом, наложение ультразвуковых колебаний на аэрозоль позволяет уменьшить время его осаждения до 600 раз.

Наряду с коагуляцией жидкостных аэрозолей исследовалась коагуляция взрывоопасных аэрозолей, образованных твердыми частицами с размерами менее 15 мкм. Для проведения экспериментальных исследований с аэрозолями, образованными твердыми частицами исходный порошок для приготовления аэрозоля помещался на дно технологического объема экспериментальной установки, затем в технологический объем по трубке подавался сжатый воздух, обеспечивающий переход порошка в аэрозольное состояние. После этого осуществлялось воздействие УЗ колебаниями, приводящими к коагуляции аэрозоля.

На рисунке 8 показано состояние аэрозоля в технологическом объеме до и после воздействия ультразвуковыми колебаниями. Эксперимент проводился при следующих условиях: уровень звукового давления – 130 дБ; частота ультразвуковых колебаний – 20,5 кГц, время воздействия 10 сек.



а) – до УЗ воздействия; б) – после УЗ воздействия

Рисунок 8 – Фото аэрозоля твердых частиц в технологическом объеме

Как следует из рисунка 8 б) после ультразвукового воздействия аэрозоль в технологическом объеме осел на боковые стенки в виде полос, расположенных в местах пучности стоячей ультразвуковой волны. Как и в случае с жидким аэрозолем, при УЗ воздействии, происходила не только коагуляция аэрозоля, но и осаждение полученных агрегатов частиц – очистка воздуха без применения дополнительных фильтров или циклонов. В таблице 2 приведены полученные значения времени коагуляции аэрозолей различных частиц в зависимости от уровня звукового давления.

Таблица 2 – Зависимость времени коагуляции от уровня звукового давления

Название аэрозоля	Размер частиц, мкм	Воздействие УЗ колебаниями с уровнем звукового давления, дБ								
		110	115	120	125	130	135	140	145	150
Сахарная пыль	10...40	4	4	4	3	3	2	2	1	1
Чайная пыль	5...20	–	6	5	4	3	2	2	1	1
Табачная пыль	4...18	6	5	5	4	3	3	2	1	1
Тонер для принтера	3...15	3	3	2	2	2	2	1	1	1
Мучная пыль	1...5	–	–	7	6	5	5	4	3	2

Знак «—» означает, что коагуляция аэрозоля не наблюдалась.

Из представленных данных следует, что наложение УЗ колебаний является эффективным средством коагуляции и осаждения полидисперсных аэрозолей твердых частиц, причем время коагуляции обратно пропорционально среднему размеру частиц дисперсной фазы аэрозоля.

Для получения полной картины эффективности процесса коагуляции необходимо рассмотреть не только коагуляцию в замкнутом технологическом объеме, но и коагуляцию в потоке воздуха. При этом известно, что вихри, возникающие в турбулентном воздушном потоке, увеличивают скорость движения частиц относительно друг друга, увеличивая вероятность их столкновения. Однако одновременно с этим, при возрастании скорости потока воздуха, переносащего аэрозоль, уменьшается время нахождения частиц в ультразвуковом поле, что отрицательно сказывается на эффективности коагуляции.

Экспериментальные исследования, направленные на определение возможности коагуляции аэрозолей в реальных технологических процессах были проведены с помощью экспериментальной установки № 2. При проведении эксперимента аэрозоль перемещался вдоль горизонтально расположенной стеклянной трубы с потоком воздуха, получаемым от вентилятора. Скорость потока регулировалась путем изменения скорости вращения вентилятора и контролировалась при помощи анемометра Testo 417. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения уровня звукового давления соответствующего коагуляции аэрозолей при различных скоростях потока воздуха

Название аэрозоля	Размер частиц, мкм	Скорость потока воздуха переносащего аэрозоль, м/с					
		0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
Сахарная пыль	10...40	130	135	140	145	150	-
Чайная пыль	5...20	135	140	145	145	150	-
Тонер для принтера	3...15	125	135	140	140	145	150
Мучная пыль	1...5	140	145	150	150	-	-

Знак «—» означает, что коагуляция аэрозоля не наблюдалась.

Из анализа полученных данных следует, что уровень звукового давления в 125...150 дБ, является достаточным для коагуляции аэрозолей в потоке воздуха со скоростью менее 1,1 м/с. Для обеспечения процесса коагуляции в потоке воздуха выше 1,3 м/с необходимо применение излучателей УЗ колебаний, обеспечивающих уровень звукового давления более 150 дБ.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов была установлена возможность и показана высокая эффективность применения для коагуляции взрывоопасных аэрозолей в газовых средах пьезоэлектрических колебательных систем с дисковыми излучателями, работающих в частотном диапазоне более 20 кГц. Установлено, что:

- ультразвуковое поле, формируемое дисковым излучателем, способствует ускорению процесса естественного осаждения аэрозолей до 600 раз;
- коагуляция жидкостных аэрозолей с диаметром частиц 3...5 мкм начинается с уровня звукового давления в 125 дБ и скорость коагуляции возрастает по мере роста звукового давления;
- коагуляция взрывоопасных аэрозолей с твердыми частицами размером менее 15 мкм начинается с уровня звукового давления в 105 дБ причем, чем выше размер

частиц аэрозоля, тем при меньшем уровне звукового давления достигается минимальное время коагуляции.

– интенсивность (150 дБ) ультразвуковых колебаний, создаваемых разработанными УЗКС, является недостаточной для получения максимальной скорости процесса коагуляции, что требует дальнейшего совершенствования их конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук и их научных руководителей № МК-383.2008.8.

Список использованных источников

1. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
2. Application of high intensity air-borne ultrasound for debubbling liquid coating layers [Text] / I. Gonzalez, J. Rodriguez, I. Garmendia, J.A. Gallego-Juarez // Ultrasonics, Elsevier USA, 2006, 44. – P. 529–532.
3. [High Power Ultrasonic Oscillatory Systems](#) [Text] / V.N. Khmelev, S.V. Levin, S.N. Tsyganok, A.N. Lebedev // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.293–298
4. Ультразвуковой преобразователь для газовых сред [Текст]: пат. №2059239 Российская Федерация: МПК6 G01N29/24 / Хмелев В.Н., Кицанов А.С., Митин А.Г., Ларионенко Г.Г.; заявитель и патентообладатель НПО «Алтай». – №93028405/28; заявл. 14.05.93; опубл. 27.04.96, Бюл. № 21. – 5 с.: ил.
5. [Ультразвуковая колебательная система](#) [Текст]: пат. №2141386 Российская Федерация: МПК6 B06B3/00 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №91720873/28; заявл. 15.12.97; опубл. 20.11.99, Бюл. № 20. – 5 с.: ил.
6. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука [Текст] / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. – 280 с.
7. Хмелев, В.Н. [Измеритель уровня высокоинтенсивного ультразвукового давления](#) [Текст] / В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Д.В. Генне, А.А. Бахирев // Межвузовский сборник «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях». – Бийск: АлтГТУ, 2005. - с.115-117