

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

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

Бийский технологический институт, г. Бийск

В статье представлены результаты комплексного исследования процесса ультразвуковой коагуляции, включающего теоретический анализ процесса и экспериментальные исследования эффективности ультразвуковой коагуляции, позволившие установить, что учет вязкости газовой среды обуславливает необходимость обеспечения ультразвукового воздействия на частоте более 20 кГц при уровне звукового давления более 130 дБ, практическое применение созданного оборудования, обеспечивающего ультразвуковое воздействие на частоте 27 кГц с интенсивностью до 150 дБ позволяет сократить время разрушения дыма до 10 раз, жидкостного аэрозоля до 11,5 раз.

Ключевые слова: аэрозоль, коагуляция, ультразвуковое воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрозоли – пыли, дымы и туманы – обширный и очень многообразный класс дисперсных систем, который играет важную роль в жизни человека. Известны многочисленные примеры использования человеком аэрозолей при получении тонкоизмельченных химических продуктов, нанесения лечебных, декоративных и технологических покрытий, введении лекарственных препаратов, использовании в качестве инсектицидов и т.п. Вместе с тем, аэрозоли могут приносить огромный вред человеку: образование тумана и выбросы вулканического пепла приводят к закрытию воздушного пространства; дым от лесных пожаров и промышленные выбросы отрицательно влияющие на экологию планеты и здоровье человека.

События последнего года, связанные извержением вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии, торфяными пожарами в России, крушениям самолетов из-за тумана, ухудшением экологической ситуации вследствие огромных промышленных выбросов определяют необходимость решения задач осаждения аэрозолей различного происхождения.

Работы в этом направлении проводятся уже более 100 лет. Однако, до сегодняшнего дня, глобальная проблема по осаждению аэрозолей не только не решена, но и не выработан единый подход к ее решению. Если для решения проблем рассеивания природного тумана и очистки промышленных выбросов существуют различные способы и оборудование, то для ликвидации последствий лесных пожаров и извержений вулканов методик и оборудования просто нет.

Особенно остро стоит проблема осаждения мелкодисперсных аэрозолей (менее 5...10 мкм),

поскольку пригодные для этого способы и оборудование практически отсутствуют.

Одним из возможных путей решений проблемы осаждения мелкодисперсного аэрозоля (антропогенного и естественного происхождения) является ультразвуковая коагуляция. Преимуществами УЗ коагуляции являются: способность коагулировать аэрозоли различного происхождения и дисперсности; применимость к взрывоопасным и агрессивным газам; возможность работы при высоких температурах и давлениях; возможность создания компактного оборудования.

К сожалению, все преимущества ультразвуковой коагуляции до настоящего времени практически не реализованы и до конца не подтверждены. Основной причиной этого является отсутствие понимания особенностей реализации процесса, что не позволяет осуществлять выбор оптимальных режимов и условий ультразвукового 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 ультразвуковой коагуляции, заключающемся в проведении теоретического анализа процесса, с целью выявления оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия, и разработке оборудования, подтверждающего эффективность ультразвуковой коагуляции.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проведенные ранее экспериментальные исследования [1, 2] были направлены на

определение эффективности коагуляции при помощи акустических колебаний низкочастотного диапазона (до 10 кГц). Обусловлено это было отсутствием источников более высокочастотного излучения, пригодных для практической проверки возможности коагуляции на более высоких частотах. Кроме того, попытки поиска теоретического объяснения полученным экспериментальным данным оказались успешными лишь в области низких частот. Это было связано с тем, что построение моделей процесса и теоретический анализ проводились без учета вязкости, которая при низких частотах не существенна, а при высоких частотах начинает оказывать существенное влияние на процесс УЗ коагуляции. Как следует из анализа результатов проведенных ранее теоретических исследований, пренебрежение вязкостью газа приводит к существенному занижению частотного диапазона, оптимального для воздействия на мелкодисперсный аэрозоль.

Поэтому, для исследования процесса коагуляции аэрозолей высокочастотными УЗ колебаниями и выявления оптимальных режимов акустического воздействия было решено разработать модель процесса, учитывающую вязкость газа.

Для построения модели использован подход, аналогичный предложенному в работе [3]. При построении модели процесса акустической коагуляции на макроскопическом уровне предположено, что кинетика коагуляции протекает таким образом, что она может быть описана уравнением Смолуховского:

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

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

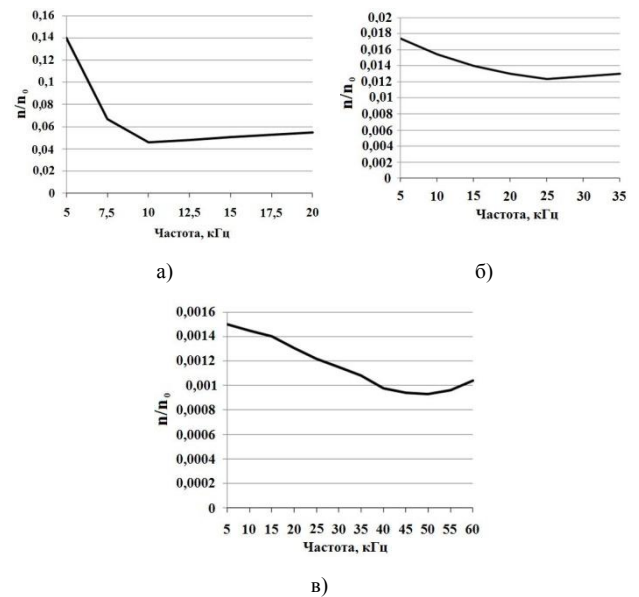
Отличительной особенностью такого подхода при разработке новой модели процесс коагуляции, в отличие от подхода, рассмотренного в работе [3] является возможность учета влияния вязкости на вероятности парного столкновения частиц.

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

Так на рис. 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 .

Анализ представленных на рис. 1 зависимостей позволил 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 10 мкм оптимальная частота лежит в пределах слышимого диапазона (рис. 1а).



а – размер частиц 10 мкм; б – размер частиц 5 мкм; в – размер частиц 1 мкм

Рис. 1. Зависимость изменения концентрации от частоты воздействия для аэрозолей с различными размерами частиц

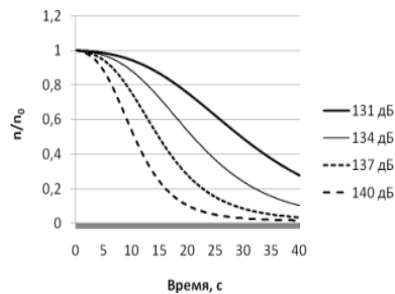
Однако, как показывает зависимость, приведённая на рис. 1а, применение для коагуляции аэрозоля с размером частиц 10 мкм частот акустических колебаний, от 15 до 20 кГц и выше, вызывает незначительную потерю эффективности коагуляции. Таким образом, оптимальные частоты акустического воздействия для реализации процесса коагуляции лежат в области ультразвуковых частот, поскольку в этом случае обеспечивается высокая эффективность коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 5 мкм) при незначительном снижении эффективности грубодисперсных аэрозолей (10 мкм и более).

На рис. 2а приведены зависимости изменения концентрации аэрозоля от времени при различных интенсивностях УЗ воздействия. Ультразвуковое воздействие осуществлялось с

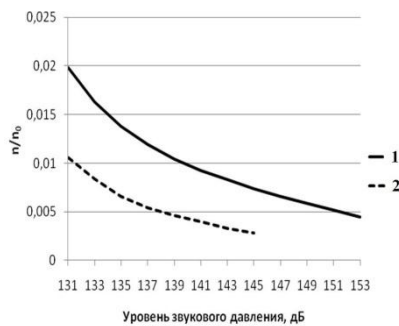
частотой 25 кГц, начальная концентрация аэрозоля была равна 10^{12} м^{-3} , размер частиц аэрозоля 5 мкм.

На рис. 26 показаны зависимости изменения отношения концентрации аэрозольных частиц через 15 с от момента начала УЗ воздействия к начальной n/n_0 от уровня звукового давления. Условия проведения эксперимента: частота колебаний 20 кГц; радиус частиц – 3 мкм.

Анализ приведенных зависимостей (рис. 2) 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 рис. 26 подтверждают факт, что коагуляция аэрозолей под действием акустических колебаний происходит более интенсивно при высоких концентрациях аэрозоля.



а)



б)

1 – начальная концентрация $n_0=3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$; 2 – начальная концентрация $n_0=9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$

Рис. 2. Зависимость концентрации аэрозоля от времени (а) и от уровня звукового давления (б)

Таким образом, анализ зависимостей представленных на рис. 1 и 2 позволил установить, что для эффективной коагуляции аэрозолей акустическое воздействие должно осуществляться в ультразвуковом диапазоне частот, с уровнем 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 высокой интенсивности (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) [4], разработанные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института.

На рис. 3 приведена фотография одного таких излучателей. Для увеличения площади излучающей поверхности (использования излучения обратной стороны диска) излучатель может быть снабжен отражателем специальной формы.



Рис. 3. Фотография ультразвуковой колебательной системы с дисковым излучателем

Для подтверждения оптимальности теоретически выявленных режимов акустического воздействия были проведены экспериментальные исследования по ультразвуковой коагуляции аэрозолей. В связи с тем, что аэрозоль представляющий угрозу жизнедеятельности человека относится либо к аэрозольям с твердой дисперсной фазой (дым, пыль) либо к аэрозольям с жидкой дисперсной фазой (туман), 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 и изготовлена лабораторная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять

регистрацию изменения плотности и дисперсного состава тумана в процессе его разрушения.

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

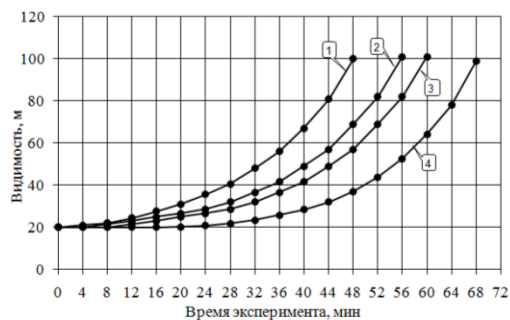
Для проведения экспериментальных исследований было использовано 4 излучателя, отличающихся диаметром дискового излучателя и мощностью создаваемых ультразвуковых колебаний. Технические характеристики излучателей (в сборе с электронными генераторами) приведены в табл. 1.

На первой стадии исследования были направлены на определение эффективности коагуляции аэрозоля с твердой дисперсной фазой. Подобные задачи возникают при необходимости осаждения аэрозолей твердых частиц, образующихся в промышленных условиях (производственный дым, дым от торфяных, лесных, степных пожаров и т.д.). В качестве меры эффективности ультразвукового воздействия оценивалось время установления требуемой дальности видимости (100 м). Определение дальности видимости осуществлялось путем измерения коэффициента ослабления излучения лазера с длиной волны 0,63 мкм по методике, описанной в [5].

Табл. 1. Технические характеристики созданных излучателей

Наименование параметра	Значение
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
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 рис. 4.



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. 4. 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 тумана 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. Такая задача возникает при необходимости рассеивания природного тумана или аэрозолей, образующихся в результате техногенных аварий.

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

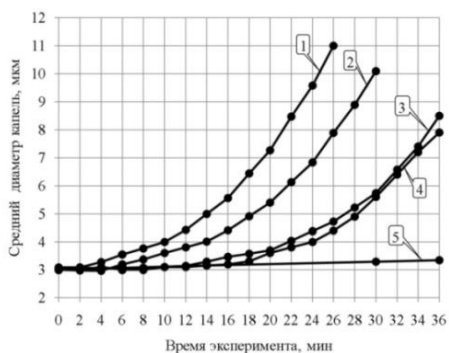
Все экспериментальные исследования по коагуляции жидкостного аэрозоля были разделены на две стадии:

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 [6].

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

На первой стадии проводилось исследование эволюции дисперсного состава аэрозоля в аэрозольной 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 рис. 5 представлены зависимости, характеризующие изменение среднего диаметра частиц тумана в процессе коагуляции.



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

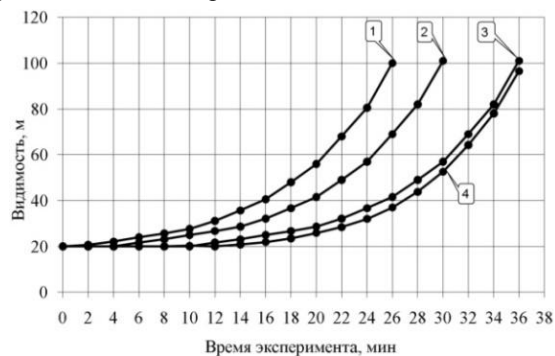
Рис. 5. Зависимость изменения среднего диаметра аэрозоля в процессе его распада

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 и увеличения дальности видимости не наблюдалось.

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 рис. 6 представлены графики изменения видимости в аэрозольной камере в процессе ультразвукового воздействия излучателями различного диаметра.



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. 6. Зависимость изменения дальности видимости в камере от времени в процессе акустического воздействия

Как и в случае с коагуляцией дыма, наблюдается сокращение времени коагуляции от диаметра используемого излучателя и уровня звукового давления генерируемых колебаний. Минимальный промежуток времени, за который происходило 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 малоомощного излучателя диаметром 250 мм, время разрушения тумана сократилось в 8,3 раза.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4, 6 позволяет сделать вывод о том, что применение больших по диаметру и мощности ультразвуковых 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 м^3 . Измерения проводились в процессе непосредственной работы ультразвукового генератора на максимальной

мощности. Расчет удельной мощности УЗ аппарата осуществляется с использованием следующего выражения:

$$P_{уд.} = \frac{P_{эл.}}{V_{ак}},$$

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

В табл. 2 представлены полученные результаты.

Табл. 2. Мощностные характеристики акустических излучателей разного диаметра при коагуляции жидкостного аэрозоля (тумана)

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). В реальных условиях применения излучателей для рассеивания природных туманов, дыма пожаров, облаков пепла, наиболее целесообразно использовать излучатель диаметром 420 мм и более, т.к. они обладают достаточным запасом мощности для работы на открытых пространствах.

Для определения перспективности промышленного применения способа ультразвуковой коагуляции аэрозолей на открытых пространствах и обоснования необходимости создания промышленного оборудования была проведена оценка экономической эффективности оборудования, на примере авиарейса Барнаул-Москва, совершаемого на самолете ТУ-214. Было подсчитано, что в случае невозможности штатной посадки общий ущерб авиакомпании составит приблизительно 513300 руб. Использование 10 излучателей (общая стоимость – 3500000 руб., эксплуатационные затраты – не более 1500 000 рублей в год), установленных на 2-х посадочных полосах позволят практически полностью закрыть проблему отмены посадок при причине туманов. Принимая в расчет, что в уже в 2010 году из-за тумана и смога только в аэропорте города Барнаула были задержаны или не прибыли вовремя около 48 рейсов экономический эффект от внедрения излучателей составит более 15 млн. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

– оптимальные условия коагуляции мелкодисперсных аэрозолей обеспечиваются ультразвуковым воздействием при частоте более 20 кГц при уровне звукового давления более 130 дБ;

– применение созданного оборудования, обеспечивающего ультразвуковое воздействие на частоте 27 кГц с интенсивностью до 150 дБ позволяет сократить время разрушения дыма до 10 раз, жидкостного аэрозоля до 11,5 раз.

Проведенный анализ экономической эффективности применения ультразвукового оборудования для разрушения туманов в условиях аэропортов показал высокую эффективность предлагаемого оборудования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. 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.
4. 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
5. Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст] / Х. Грин; пер. с англ. изд. Н.А. Фукса. – Л.: Химия, 1972. – 428 с
6. 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

Хмельев 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

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИАМП–2010
СЕКЦИЯ 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел.
(3854)435323, e-mail: shk@bti.secna.ru.*

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