

Исследование возможности воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой частоты на промышленные туманы

[В.Н. Хмелёв](#), [А.В. Шалунов](#), [Р.В. Барсуков](#), [С.Н. Цыганок](#), [Д.В. Генне](#), К.В. Шалунова, [М.В. Хмелёв](#)

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, Россия

Аннотация – В статье представлены результаты экспериментов по определению возможности разрушения тонкодисперсных (3 мкм и менее) промышленных туманов акустическими колебаниями ультразвуковой частоты. Эксперименты по разрушению промышленных туманов проводились в аэрозольной камере объемом 1,25 м³. В качестве источника ультразвуковых колебаний применялась пьезоэлектрическая колебательная система с дисковым излучателем. Показано, что применение ультразвукового воздействия позволяет сократить время разрушения тумана до 3 раз.

Ключевые слова – акустические колебания, воздушно-капельная дисперсия, разрушение.

1. ВВЕДЕНИЕ

ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ веществ являются, пожалуй, главной экологической проблемой на сегодняшний день. Это связано с бурным ростом промышленных предприятий, которые ежегодно выбрасывают в воздушную среду более 1 млн. тонн различных аэрозольных выбросов. К их числу следует отнести пыль, туман и дым.

Туманы (воздушно-капельные дисперсии) состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации паров или распылении жидкости. В промышленности туманы образуются в различных технологических процессах: получения серы, различных солей упаркой, производства серной кислоты и термической фосфорной кислоты, в результате применения смазочно-охлаждающих жидкостей и т.д.

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 проникать в альвеолы легких и кровяную систему человека.

Для улавливания промышленных туманов существует различное оборудование: циклоны, фильтры, электрофильтры и т.д. Основным недостатком такого оборудования является низкая эффективность очистки промышленного газа именно 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. В связи с этим, возможным способом разрушения промышленного тумана является использование нового вида энергии, способствующего повышению эффективности процесса разрушения тумана, например энергии акустических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности (ультразвуковая коагуляция).

Преимуществами ультразвуковой коагуляции являются: возможность осаждать высокодисперсные аэрозоли; применимость к агрессивным и взрывоопасным газам; возможность работы при высоких температурах и давлениях; высокая эффективность и низкая энергоемкость процесса. Однако существующие оборудование для реализации ультразвукового способа улавливания характеризуется низкой эффективностью, что связано с низкоэффективными «устаревшими» источниками УЗ колебаний (сирены, свистки Гартмана).

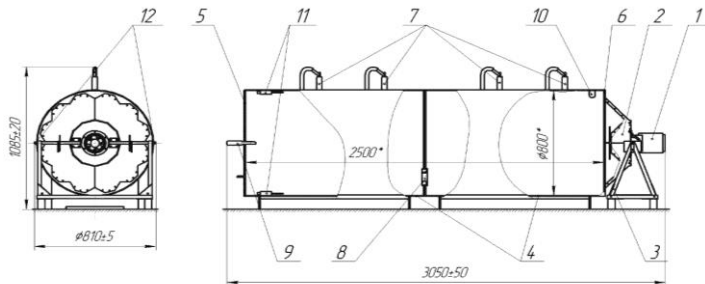
Теоретические исследования процесса ультразвуковой коагуляции показывают, что для эффективной коагуляции достаточно грубодисперсных аэрозолей с частицами размером порядка 40...50 мкм хороший результат получается при частотах от 2 до 6 кГц [1, 2], которые обеспечиваются с помощью аэродинамических излучателей. В то время как для эффективной коагуляции мелкодисперсного аэрозоля (размер частиц менее 5 мкм) требуется воздействие колебания с частотой более 20 кГц [3], что невозможно обеспечить при использовании аэродинамических излучателей.

На сегодняшний день, разработанные в Бийском технологическом институте, пьезоэлектрические колебательные системы, способные генерировать колебания высокой частоты, являются наиболее эффективной альтернативой свисткам [4-6]. Поэтому в данной статье приведены результаты экспериментальных исследований возможности разрушения мелкодисперсного тумана ультразвуковыми колебаниями высокой частоты, генерируемых пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системой (УЗКС).

II. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Для этой цели была разработана лабораторная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять регистрацию изменения плотности и дисперсного состава тумана в процессе его разрушения. Внешний вид лабораторной установки представлен на Рис. 1. Объем аэрозольной камеры равен $1,25 \text{ м}^3$.

Основу аэрозольной камеры составляет металлический кожух (поз. 4) с конструктивными ребрами жесткости (фланцами) и опорой для установки на фундаменте. В верхней части кожуха выполняются отверстия для присоединения выходных патрубков от ингаляторов (поз. 7).



1 – ультразвуковая колебательная система с излучателем дискового типа; 2 – отражатель; 3 – поворотное устройство; 4 – кожух; 5 – крышка с технологическими отверстиями; 6 – фланец для изображения контрастных объектов; 7 – ингаляторы ультразвуковые «Муссон-2»; 8 – вентилятор; 9 – микрофон шумомера; 10 – люминесцентная лампа; 11 – термометры сопротивления; 12 – оптический датчик

Рис. 1. Эскиз лабораторной установки

Ультразвуковая колебательная система с излучателем дискового типа (поз.1) предназначена для осуществления воздействия на имитацию промышленного тумана ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. Принцип действия УЗКС заключается в преобразовании энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых пластин или дисков, сложной конфигурации [7]. Фотография ультразвуковой колебательной системы приведена на Рис.2.



Рис.2. Фотография ультразвуковой колебательной системы с дисковым излучателем

В Табл. I приведены технические характеристики используемой ультразвуковой колебательной системы с дисковым излучателем.

ТАБЛИЦА I

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКС

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Частота механических колебаний, кГц	27 ± 1.85
2	Диаметр дискового излучателя, мм	250
3	Диапазон регулирования мощности излучения, %	10 – 100
4	Уровень звукового давления на расстоянии 1 м, дБ не менее	140

На фланце (поз.6) размещаются изображения контрастных объектов, фотографическая съемка которых выполняется через специальное отверстие, выполненное на крышке (поз.5). Для освещения контрастных объектов внутри аэрозольной камеры устанавливается источник света – люминесцентная лампа (поз.10).

Для имитации промышленного тумана в аэрозольной камере используются ультразвуковые ингаляторы (поз.7) 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.

Для получения более однородного распределения частиц, воздушно-капельная дисперсия, создаваемая ингалятором, некоторое время отстаивалась. 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 3 мкм).

Для равномерности заполнения внутреннего пространства малой аэрозольной камеры внутри устанавливается вентилятор (поз.8), который включается во время работы ультразвуковых ингаляторов.

Для измерения уровня звукового давления предназначен микрофон (поз.9) шумомера. Для измерения температурных полей внутри аэрозольной камеры применяются термометры сопротивления (поз.11) Термометры сопротивления через согласующее устройство и аналого-цифровой преобразователь подключались к персональному компьютеру.

Для получения количественных характеристик воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности использовались оптические датчики (поз.12), которые устанавливаются в различных сечениях аэрозольной камеры на разных уровнях.

III. 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 двух плоскостях (ABCD и A'B'C'D'), как показано на Рис.3. Плоскость ABCD пересекает объем аэрозольной камеры

вертикально вдоль ее оси OO' на две равные части, а плоскость $A'B'C'D'$ рассекает объем аэрозольной камеры горизонтально вдоль ее оси OO' на две равные части.

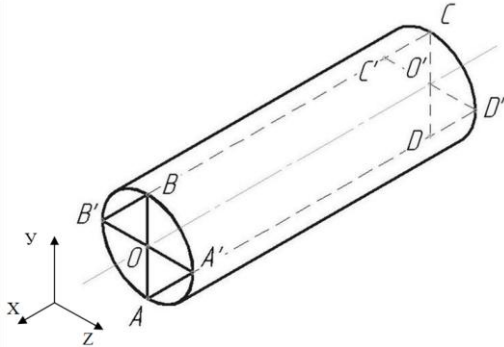


Рис. 3. Плоскости аэрозольной камеры для определения распределения уровня звукового давления.

В Табл. II представлены результаты измерений в плоскости ABCD, при этом вдоль оси X микрофон перемещался с шагом 156 мм, а вдоль оси Y микрофон перемещался с шагом 88 мм.

Среднее значение уровня звукового давления в плоскости ABCD составило 136.8 дБ.

В Табл. III представлены результаты измерений в плоскости $A'B'C'D'$, при этом вдоль оси X микрофон перемещался с шагом 156 мм, а вдоль оси Z микрофон перемещался с шагом 88 мм.

ТАБЛИЦА II
 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ (дБ) В ПЛОСКОСТИ ABCD

		Расстояние до плоскости излучателя, мм															Среднее
		2340	2184	2028	1872	1716	1560	1404	1248	1092	936	780	624	468	312	156	
Высота микрофона над нижней точкой камеры, мм	704	128	136	137	134	136	127	128	135	131	127	134	130	135	136	126	132.0
	616	139	133	140	140	138	133	139	138	135	134	135	138	132	131	137	136.1
	582	137	138	135	138	141	135	133	133	140	133	136	137	132	137	134	135.9
	440	139	133	141	139	136	142	134	132	138	141	139	135	141	138	138	137.7
	352	123	138	139	142	135	133	144	135	133	137	130	135	136	137	135	135.5
	264	138	131	143	140	143	137	148	145	150	138	141	143	136	136	138	140.5
	176	133	138	132	142	141	141	138	151	143	138	143	138	133	133	135	138.6
	88	136	133	136	138	140	143	146	146	148	147	133	135	133	133	132	138.6
Среднее		134.1	135.0	137.9	139.1	138.8	136.4	138.8	139.4	139.8	136.9	136.4	136.4	134.8	135.1	134.4	

ТАБЛИЦА III
 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ (дБ) В ПЛОСКОСТИ $A'B'C'D'$

		Точки измерений															Среднее
		2340	2184	2028	1872	1716	1560	1404	1248	1092	936	780	624	468	312	156	
Высота микрофона над нижней точкой камеры, мм	704	125	125	130	132	125	123	135	125	132	132	126	126	132	119	119	127.1
	616	127	129	127	122	128	132	137	123	133	135	131	133	123	126	127	128.9
	582	127	129	132	126	129	132	126	127	136	125	131	128	131	129	121	128.6
	440	122	123	129	123	129	130	124	136	137	133	133	134	129	123	120	128.3
	352	117	130	127	128	123	120	135	137	138	133	132	128	131	125	125	128.6
	264	113	123	130	131	132	122	134	150	139	131	126	133	125	128	123	129.3
	176	124	125	125	132	126	129	130	153*	143	125	125	123	128	127	127	129.5
	88	125	124	126	133	126	134	133	143	128	132	123	131	125	122	124	128.6
Среднее		122.5	126.0	128.3	128.4	127.3	127.8	131.8	136.8	135.8	130.8	128.4	129.5	128.0	124.9	123.3	

Среднее значение уровня звукового давления в плоскости $A'B'C'D'$ составило 126 дБ.

Среднее значение уровня звукового давления в аэрозольной камере по результатам измерений составило 134.1 дБ, что является достаточным для интенсификации процесса разрушения тумана [1, 8].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все экспериментальные исследования, проводимые в аэрозольной камере, были разделены на три этапа:

1. Исследование эволюции дисперсного состава тумана в аэрозольной камере в процессе акустического воздействия и при естественном разрушении аэрозоля;

2. Определение времени разрушения тумана в аэрозольной камере при различных условиях;

3. Определение зависимости времени разрушения тумана от мощности ультразвукового воздействия.

Первый этап экспериментальных исследований заключался в исследовании эволюции дисперсного состава воздушно-капельной дисперсии в процессе ее естественного разрушения и при воздействии ультразвуковыми колебаниями высокой частоты. Для получения достоверных результатов обеспечивались постоянные условия проведения эксперимента (Табл. IV).

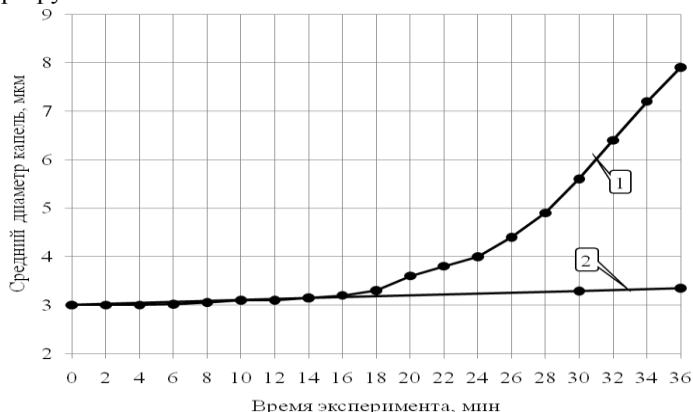
ТАБЛИЦА IV

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
 ЭВОЛЮЦИИ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ТУМАНА

Наименование параметра	Ед. изм.	Измеренное значение
Высота тумана	м	4
Влажность	%	92
Средняя температура в камере	град	2,2
Скорость движения потоков	м/с	0,2
Давление в большой аэрозольной камере	мм рт. ст.	751

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 15 минут для случая естественного разрушения тумана и каждые 2 минуты при воздействии акустическими колебаниями. Эксперимент продолжался в течение 36 минут. Дисперсный состав аэрозоля определялся при помощи метода спектральной прозрачности, реализующей оптический способ определения дисперсности субмикронных частиц [9].

На Рис. 4 представлены зависимости, характеризующие изменение среднего диаметра частиц тумана в процессе его разрушения.



1 – воздействие излучателем диаметром 250 мм; 2 – без акустического воздействия

Рис. 4. Зависимость изменения среднего диаметра воздушно-капельной дисперсии в процессе ее разрушения

Как и следовало ожидать, при осуществлении акустического воздействия происходит увеличение среднего диаметра капель тумана (с 3 мкм до 8 мкм), за счет их коагуляции. Это позволяет сделать вывод, что время разрушения тумана значительно сократится, 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 (36 минут) эволюции дисперсного состава не происходило и увеличения дальности видимости не наблюдалось.

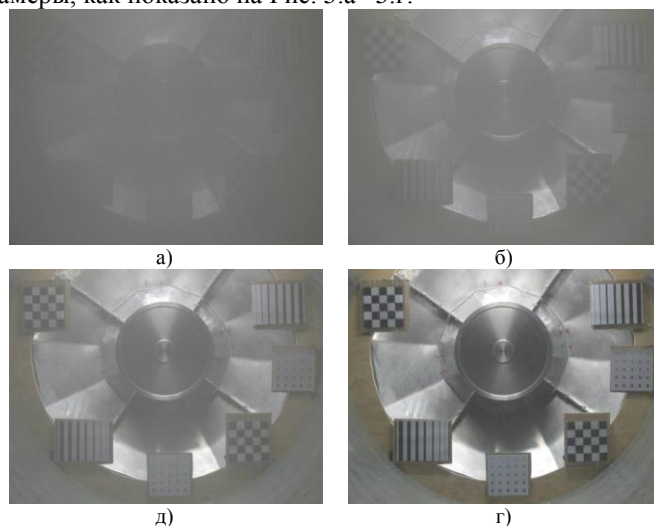
В ходе проведения следующего этапа экспериментов в аэрозольной камере были получены данные, характеризующие скорость разрушения тумана при

различных условиях. Всего было проведено 4 серии экспериментов:

- 1) естественное разрушение аэрозоля в аэрозольной камере без использования принудительной циркуляции потоков и без ультразвукового воздействия;
- 2) искусственное разрушение аэрозоля в аэрозольной камере без использования принудительной циркуляции потоков, с ультразвуковым воздействием;
- 3) естественное разрушение аэрозоля в аэрозольной камере с использованием принудительной циркуляции потоков, без ультразвукового воздействия;
- 4) искусственное разрушение аэрозоля в аэрозольной камере с использованием принудительной циркуляции потоков и с ультразвуковым воздействием.

Камера наполнялась туманом при помощи 4-х ингаляторов в течение 10 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.



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 проведения эксперимента с принудительной циркуляцией потоков и с ультразвуковым воздействием

В Табл. V представлены кинограммы контрастных объектов типа «шашки», размещенных аэрозольной камере. Кинограммы составлены по результатам следующих экспериментов:

- №1 – разрушение аэрозоля без принудительной циркуляции потоков и без ультразвукового воздействия в аэрозольной камере;
- №2 – разрушение аэрозоля без принудительной циркуляции потоков, с ультразвуковым воздействием в аэрозольной камере;
- №3 – разрушение аэрозоля с принудительной циркуляцией потоков, без ультразвукового воздействия в аэрозольной камере;
- №4 – разрушение аэрозоля с принудительной циркуляцией потоков и с ультразвуковым воздействием в аэрозольной камере.

ТАБЛИЦА V
 Кинограммы, полученные в ходе проведения
 ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Время, мин:се к	Номер эксперимента			
	№1	№2	№3	№4
00:00				
01:00				
02:00				
03:00				
04:00				
05:00				
06:00				
07:00				
08:00				
09:00				
10:00				
11:00				
12:00				
13:00				
14:00				
15:00				
16:00				

Из анализа представленных кинограмм можно сделать вывод, что минимальное время увеличения контрастности графических объектов достигалось в двух экспериментах: без принудительной циркуляции потоков, с ультразвуковым воздействием; с принудительной циркуляцией потоков и ультразвуковым воздействием в аэрозольной камере. Это свидетельствует о том, что наличие или отсутствие воздушных потоков в аэрозольной камере не влияет на эффективность ультразвукового разрушения

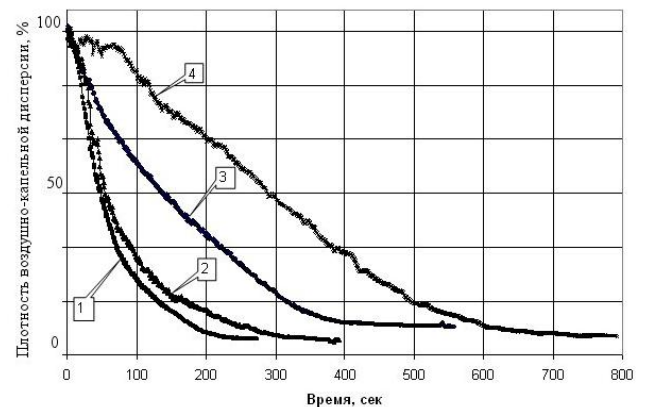
воздушно-капельной дисперсии. Таким образом, использование акустических колебаний ультразвуковой частоты для разрушения воздушно-капельных дисперсий возможно как в промышленных помещениях при отсутствии потоков, так при наличии воздушных потоков, например, в трубопроводах.

Одновременно с фотосъемкой проводились косвенные измерения (с интервалом 1 сек) плотности аэрозоля, имитирующего промышленный туман, с помощью оптической пары 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 на кинограмме 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. 6 представлены зависимости плотности аэрозоля от времени в аэрозольной камере в ходе проведения экспериментов.



1 – эксперимент с принудительной циркуляцией потоков в аэрозольной камере и ультразвуковым воздействием; 2 – эксперимент без принудительной циркуляции потоков в аэрозольной камере с ультразвуковым воздействием; 3 – эксперимент с принудительной циркуляцией потоков в аэрозольной камере без ультразвукового воздействия; 4 – эксперимент без принудительной циркуляции потоков в аэрозольной камере и без ультразвукового воздействия.

Рис. 6. Изменение плотности аэрозоля, имитирующего промышленный туман, в ходе проведения экспериментов

Из приведенной зависимости изменения плотности аэрозоля от времени УЗ воздействия можно сделать вывод о значительном сокращении времени разрушения воздушно-капельной дисперсии при наложении УЗ колебаний. В результате проведенного эксперимента установлено, что применение ультразвукового воздействия позволяет уменьшить время разрушения воздушно-капельной дисперсии до 3 раз.

Последним этапом проводимых экспериментов являлось определение зависимости скорости разрушения тумана от величины мощности ультразвукового воздействия.

Условия проведения эксперимента:

- диапазон изменения мощности от 10 до 270 Вт с шагом 10 Вт;
- наличие принудительной циркуляции;
- продувка камеры 10 минут;
- заполнение камеры воздушно-капельной дисперсией 10 минут;
- выдержка в течение 3 минут, для осаждения наиболее крупной фракции воздушно-капельной дисперсии;
- длительность эксперимента для каждого уровня мощности определялось временем изменения сопротивления фотодатчика от 36 КОм (соответствует плотности аэрозоля в камере после 10-ти минутного заполнения камеры) до значения равного 10 КОм.

На Рис. 7 представлена зависимость времени разрушения аэрозоля в аэрозольной камере от мощности ультразвукового воздействия.

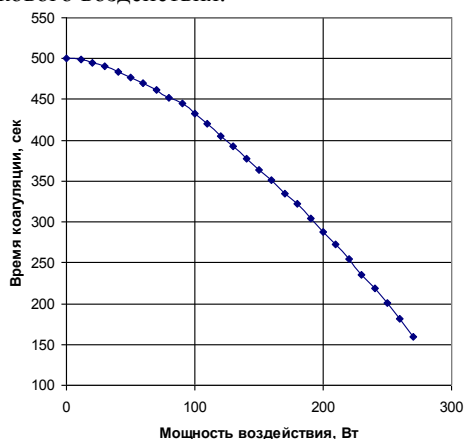


Рис.7. Зависимость времени разрушения аэрозоля в аэрозольной камере от мощности ультразвукового воздействия.

Из полученной (Рис.7) зависимости видно, что при увеличении мощности ультразвукового воздействия происходит уменьшение времени разрушения тумана. Это позволяет утверждать, что применение более мощных ультразвуковых излучателей существенно сократит время разрушения тумана.

В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных экспериментов была установлена эффективность воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности для разрушения тонкодисперсного промышленного тумана, плохо улавливающегося другими способами. Установлено, что:

1. При осуществлении акустического воздействия происходит увеличение среднего диаметра капель тонкодисперсного тумана (с 3 мкм до 8 мкм), за счет их коагуляции. Укрупнение среднего диаметра частиц значительно ускоряет время разрушения тумана за счет их интенсивного оседания под действием силы тяжести.

2. Применение ультразвукового воздействия позволяет сократить время разрушения воздушно-капельной дисперсии до 3 раз.

3. Время разрушения тумана сокращается по мере увеличения мощности ультразвукового воздействия.

4. Полученная зависимость времени разрушения тумана от мощности УЗ воздействия дает предпосылки для разработки и применения более мощных ультразвуковых излучателей, характеризующихся высокой интенсивностью генерируемых колебаний.

БЛАГОДАРНОСТЬ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 688 с.
- [2] Фукс, Н. Механика аэрозолей / Под ред. Б.В. Дерягин. – М.: Издательство академии наук СССР, 1955. - 352 с.
- [3] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. Исследование процесса коагуляции частиц под воздействием ультразвуковых колебаний// Межвузовский сборник «Инновационные технологии: производство, экономика, образование», 2009. С. 335-342
- [4] Хмелев 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](#) // Современные проблемы технической химии. Материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции, 2009. Секции 5-7. С. 21 – 26
- [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](#) // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009, 2009. pp. 250-253.
- [6] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V. [The Acoustical Coagulation of Aerosols](#) // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials. EDM'2008, 2008. pp. 289-294.
- [7] Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. [Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве](#). – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.
- [8] Страус В. Промышленная очистка газов/ Под ред. Ю.Я. Косого. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
- [9] Титов С.С. К вопросу решения обратной задачи оптики аэрозоля в реализации метода спектральной прозрачности // Межвузовский сборник «Инновационные технологии: производство, экономика, образование», 2009. С. 261-267