

Исследование Возможности Ультразвуковой Коагуляции в Поточе Воздуха

[Владимир Н. Хмелев](#), *Senior Member*, IEEE, [Андрей В. Шалунов](#), Ксения В. Шалунова, *Student Member*, IEEE,
Александра А. Антонникова

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

Аннотация – В статье представлены результаты экспериментов по определению возможности ультразвуковой коагуляции аэрозоля в потоке воздуха. Эксперименты проводились при различных скоростях воздушного потока. Показано, что применение ультразвукового воздействия позволяет повысить степень очистки газового потока от 3 до 6 раз в зависимости от скорости потока.

Ключевые слова – аэрозоль, коагуляция, очистка

I. ВВЕДЕНИЕ

Защита от загрязнений промышленными выбросами в виде мелко дисперсных аэрозолей, осуществляемых предприятиями химической промышленности, является одной из важнейших задач охраны окружающей среды.

Для пылеулавливания применяют различные аппараты, отличающиеся друг от друга как по конструкции, так и по способу осаждения взвешенных частиц.

Эффективность аппаратов всех типов уменьшается по мере увеличения дисперсности аэрозоля. Поэтому, для ускорения и повышения эффективности процесса очистки промышленных газов целесообразно предварительно укрупнять мелкие взвешенные частицы. Для этой цели может быть использовано явление акустической (ультразвуковой) коагуляции, так как оно обладает следующими преимуществами: возможностью улавливания частиц с размером менее 1 мкм; взрыво- и пожаробезопасностью; применимостью к агрессивным средам; возможностью работы при высоких температурах и давлениях [1,2].

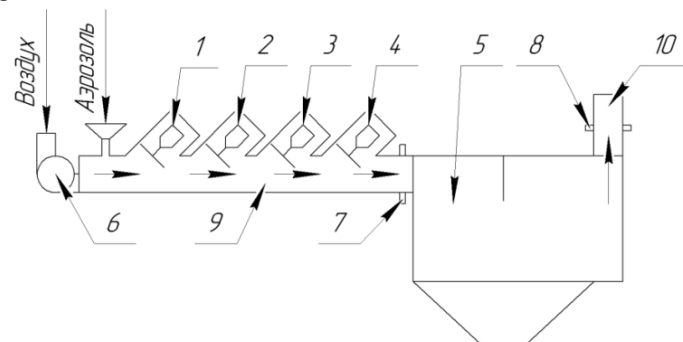
Наибольший интерес при исследовании процесса УЗ коагуляции представляет случай коагуляции аэрозолей в потоке воздуха. Исследование процесса коагуляции аэрозоля, переносимого потоком воздуха, позволит установить возможность и перспективность практического применения УЗ коагуляции в промышленных объектах при движении аэрозоля с потоком воздуха.

В связи с этим возникает необходимость проведения исследований процесса УЗ коагуляции аэрозоля в потоке воздуха.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования проводились в специальной установке, эскиз которой представлен на Рис. 1.

Основу экспериментальной установки составляет осадительная камера 5, входной 9 и выходной 10 патрубков. Аэрозоль поступает в коагуляционную камеру посредством входного патрубка 9, где подвергается воздействию УЗ колебаний. Для отвода коагулируемого аэрозоля предназначен выходной патрубок 10.



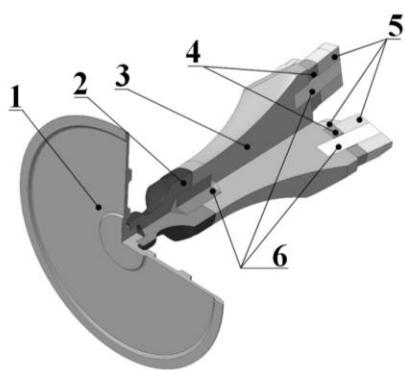
1 – УЗКС 320 мм; 2 – УЗКС 420 мм; 3 – УЗКС 360; 4 – УЗКС 250;
5 – осадительная камера; 6 – нагнетатель; 7 – измеритель плотности аэрозоля (ИПА 1); 8 – ИПА 2; 9 – входной патрубок 10 – выходной патрубок

Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки для исследования УЗ коагуляции в потоке воздуха

При исследовании процесса коагуляции к источникам УЗ колебаний предъявлялись следующие требования: частота колебаний более 20 кГц (т.е. в ультразвуковой диапазон частот); уровень звукового давления не менее 130 дБ. Использование акустического воздействия в указанных режимах позволит обеспечить максимальную эффективность процесса [3-5].

Излучателем, способным обеспечивать акустическое воздействие в ультразвуковом диапазоне частот с уровнем звукового давления свыше 130 дБ, является пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система (УЗКС) [6, 7].

Конструкция УЗКС, разработанной в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института АлтГТУ, схематично показана на Рис. 2.



1 – дисковый излучатель 2 – концентратор; 3 – преобразователь;
 4 – пьезоэлектрические элементы; 5 – задние отражающие накладки;
 6 – стягивающие шпильки;
 Рис. 2. Трехполуполновая УЗКС с дисковым излучателем

Представленная конструкция УЗКС состоит из двуполуполнового преобразователя 3-5, полуполнового концентратора 2, дискового излучателя 1.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на определение возможности ультразвуковой коагуляции в потоке воздуха, было использовано 4 УЗКС. Технические характеристики используемых систем приведены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АППАРАТОВ

Наименование параметра	Значение			
	УЗКС 250	УЗКС 320	УЗКС 360	УЗКС 420
Диаметр излучателя дискового типа, мм	250	320	360	420
Максимальная потребляемая мощность, не более ВА	200	350	450	600
Диапазон регулирования мощности, %	10–100	10–100	10–100	10–100
Уровень звукового давления (1 м), дБ, не менее	140	144	146	150
Частота механических колебаний, кГц	21±0,5	32±0,5	25±0,5	27±0,5

Значительное различие технических характеристик излучателей позволило обеспечить одновременно воздействие на аэрозоль различными частотами.

УЗКС устанавливаются во входном патрубке 1 под углом 45° к оси патрубка, что позволяет за счет многократного отражения звуковых волн от верхней и нижней стенок входного патрубка добиться равномерного распределения звукового давления во входном патрубке.

Первым по направлению движения аэрозоля был размещен самый высокочастотный излучатель, затем остальные по мере убывания частоты излучения. Такое расположение излучателей наиболее эффективно, поскольку позволяет постепенно понижать частоту воздействия по мере увеличения размера частичек аэрозоля при их коагуляции. При проведении исследований обеспечился максимальный уровень звукового давления для каждой из УЗКС.

Для определения эффективности ультразвуковой коагуляции концентрация аэрозоля измеряется в двух точках:

– точка ИПА 1 для измерения концентрации аэрозоля до ультразвукового воздействия;

– точка ИПА 2 для измерения концентрации аэрозоля после воздействия ультразвуковыми колебаниями, на выходе из осадительной камеры.

Для создания воздушных потоков использовался вентилятор 3. Скорость перемещения воздушных потоков внутри аэрозольной камеры измерялась и контролировалась при помощи анемометра LV 110. При проведении эксперимента скорость воздушных потоков изменялась от 2 м/с до 16 м/с с шагом 2 м/с. Выбор диапазона скоростей был обусловлен характеристиками существующего газоочистного оборудования (для эффективной работы самого распространенного устройства для пылеулавливания – циклона – скорость запыленного потока во входном патрубке обычно составляет не более 16 м/с).

Для охвата наиболее широкого спектра случаев возможного практического применения ультразвуковой коагуляции при проведении экспериментальных исследований были использованы аэрозоли, как с жидкой, так и твердой дисперсной фазой. Состав частиц дисперсной фазы и их размер приведены в Табл. II.

ТАБЛИЦА II
 АЭРОЗОЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Название аэрозоля	Размер частиц, мкм
1 Аэрозоль водный №1 (создаваемый распылителем «Cyclon Ultra-Flex»)	5–10
2 Известковая пыль	5–10
3 Аэрозоль водный №2 (создаваемый ультразвуковыми ингаляторами серии «Муссон-2»)	2–5
4 Мучная пыль	1–5

При проведении эксперимента начальная концентрация аэрозолей равнялась 20 г/м³. Эффективность ультразвуковой коагуляции рассчитывалась по формуле [8]:

$$\eta = (1 - \frac{n_2}{n_1}) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где η – эффективность ультразвуковой коагуляции, %;
 n_1 – концентрация аэрозоля в начале эксперимента, г/м³;
 n_2 – концентрация аэрозоля в конце эксперимента, г/м³.

Для сравнения эффективности ультразвуковой коагуляции с другими методами очистки газовых потоков было решено провести эксперименты при тех же условиях (количество аэрозолей, их концентрация, скорость воздушных потоков), только без ультразвукового воздействия. Данный эксперимент будет имитировать процесс газоочистки в пылевых мешках.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов по исследованию эффективности газоочистки при ультразвуковом воздействии и без него представлены на Рис.3.

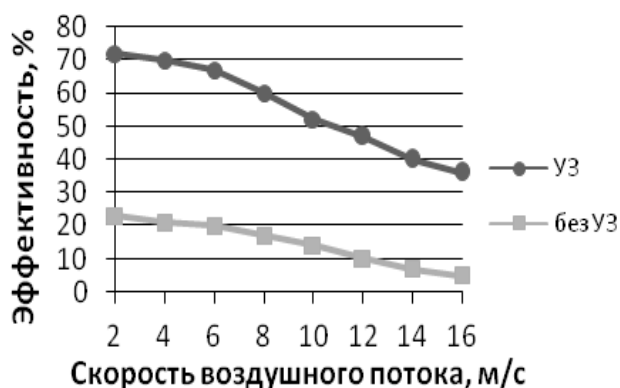
Из представленных на Рис. 3 зависимостей видно, что эффективность ультразвуковой коагуляции падает с ростом скорости воздушных потоков.

Так, при скоростях воздушного потока до 8 м/с эффективность ультразвуковой коагуляции даже мелкодисперсных аэрозолей (размер частиц 1-5 мкм) составляет порядка 55 %, а при скорости воздушного потока 16 м/с не достигает и 30 %. Невысокие значения эффективности процесса очистки при скорости воздушных потоков более 8 м/с могут быть объяснены недостаточным временем пребывания аэрозоля в ультразвуковом поле.

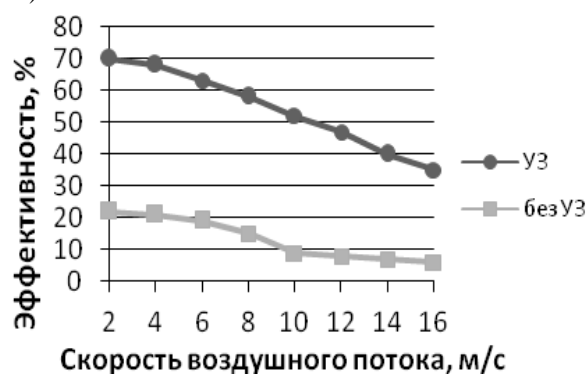
Однако, несмотря на уменьшение эффективности ультразвуковой коагуляции при увеличении скорости воздушных потоков, применение ультразвуковых колебаний позволяет существенно интенсифицировать процесс очистки газового потока. При минимальной исследуемой скорости

воздушных потоков (2 м/с) применение ультразвукового воздействия позволяет повысить степень очистки более чем в 3 раза, в случае с максимальной скоростью воздушных потоков (16 м/с) – более чем в 6 раз.

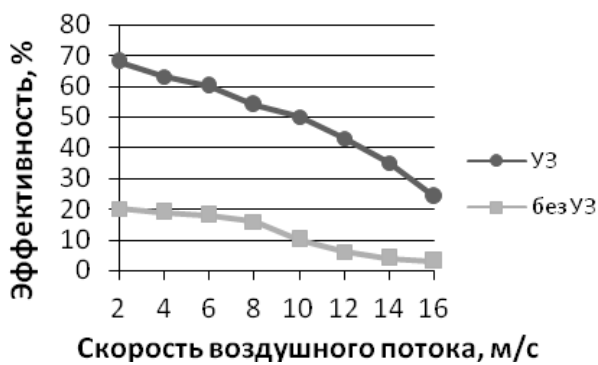
Следует заметить, что при скоростях воздушных потоков до 8 м/с ультразвуковую коагуляцию можно использовать как самостоятельный способ очистки газовых потоков (максимальное значение эффективности процесса коагуляции составляет 72%). При скорости воздушных потоков свыше 8 м/с ультразвуковую коагуляцию эффективно применять в качестве предварительной или первой ступени обработки газовых потоков с последующим улавливанием дисперсной фазы в инерционных или других пылеуловителях (минимальное значение эффективности процесса коагуляции при скорости потока в 16 м/с порядка 20%).



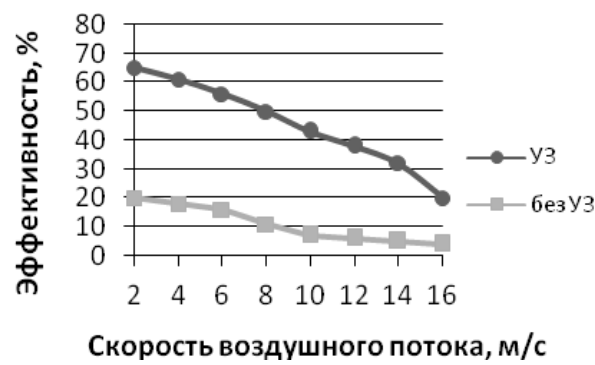
а)



б)



в)



г)

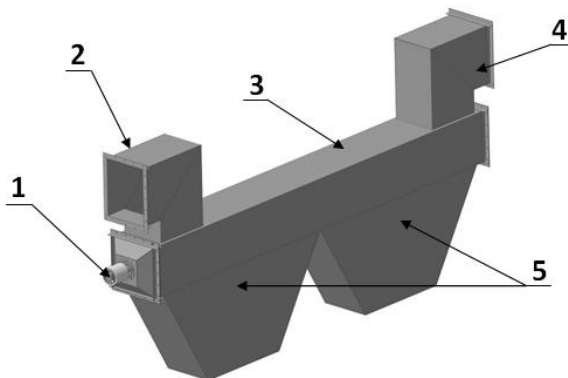
а) – аэрозоль водный № 1; б) – известковая пыль; в) – аэрозоль водный № 2; г) – мучная пыль
 Рис. 3. Зависимость эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей от скорости воздушных потоков

Полученные результаты говорят о высокой эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей и о возможности ее промышленного применения для очистки отходящих газов или улавливания полезных веществ из газовой среды при наличии воздушных потоков, например, в газоходах и осадительных камерах.

V. ВАРИАНТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ УЗ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ

На основе полученных экспериментальных результатов были предложены варианты практического использования ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газов. Самым простым вариантом использования УЗ коагуляции для очистки промышленных газов является монтаж ультразвуковых излучателей непосредственно в газопровод или трубопровод [9,10] (Рис.4).

Такая установка может быть выполнена в виде протяженного канала воздухопровода, в нижней части которого в местах пучности УЗ колебаний выполнены отверстия, соединенные с бункером для коагулированных дисперсных частиц. Размеры дымохода должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечивался режим стоячей волны (использование в наибольшей степени энергии звуковой волны) и время пребывания частиц в камере было достаточным для процесса коагуляции. Существенным преимуществом предлагаемых устройств для ультразвуковой коагуляции в газоочистных системах является возможность работы в агрессивных средах (газах), при высоких давлениях и температурах [11]. В этом случае, единственное требование, предъявляемое к системе газоочистки, относится к материалу из которого изготавливается технологический (рабочий) объем. Материал должен обладать химической стойкостью к воздействию агрессивных газов и высоким коэффициентом отражения УЗ волн.

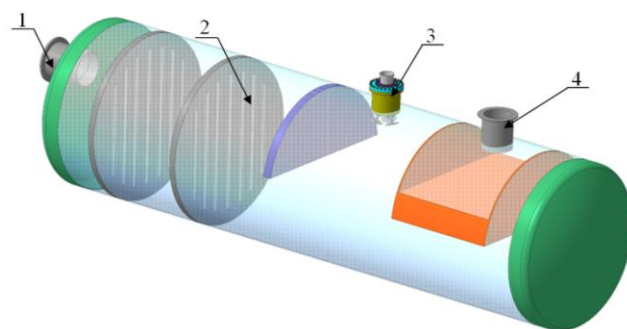


1 – УЗКС; 2 – входной патрубок; 3 – дымоход (камера коагуляции);
4 – выходной патрубок; 5 – емкость для сбора частиц
Рис. 4. Эскиз проекта промышленной установки на основе УЗКС для УЗ коагуляции аэрозолей

Загрязненный газ поступает в систему очистки через входной патрубок 2, где, двигаясь по дымоходу 3, попадает в ультразвуковое поле и подвергается воздействию УЗ колебаний, генерируемых УЗКС 1. В результате УЗ воздействия происходит коагуляция взвешенных в газе частиц. Коагулированные частицы под действием силы тяжести осаждаются в емкость для сбора частиц 1, а очищенный газ выходит через выходной патрубок 4.

Применение ультразвуковых аппаратов, непосредственно смонтированных в дымопроводы в качестве самостоятельного газоочистного оборудования, оправдано лишь при небольших скоростях потока. В противном случае ультразвуковую коагуляцию можно рекомендовать использовать как первую ступень очистки газового потока или использовать непосредственно перед дополнительным пылеулавливающим оборудованием для увеличения размеров улавливаемых частиц.

На Рис. 5 приведена модель сепаратора для очистки жидкостных включений в попутном газе, с установленными ультразвуковыми аппаратами для коагуляции аэрозолей [12].



1 – выходной патрубок; 2 – насадки; 3 – ультразвуковые аппараты;
4 – входной патрубок
Рис. 5. 3D-модель сепаратора

Попутный нефтяной газ поступает в сепаратор через входной патрубок 4. Двигаясь по сепаратору, газ попадает под воздействие УЗ колебаний 3, в результате чего жидкостные включения начинают укрупняться за счет их коагуляции. Наиболее крупные частицы осаждаются здесь же под действием силы тяжести. Значительно укрупненные частицы, двигаясь вместе с потоком газа, проходят через ряд специальных насадок 2, где они успешно задерживаются (улавливаются). Очищенный газ удаляется из сепаратора через выходной патрубок 1. Эффективность процесса задерживания (улавливания) значительно повышается за счет предварительной обработки газа ультразвуковыми колебаниями. Установка ультразвукового оборудования позволит уменьшить вынос жидкости из сепаратора за счет ее коагуляции и последующего улавливания укрупненных капель имеющимися в сепараторе насадками.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований была установлена возможность и показана эффективность ультразвуковой коагуляции аэрозолей в потоке воздуха. Установлено, что акустическое воздействие в ультразвуковом диапазоне частот позволяет коагулировать аэрозоли в потоке воздуха, тем самым увеличивая степень их очистки от 3 до 6 раз, в зависимости от скорости потока. Предложены новые конструкции устройств для очистки загрязненного газа от дисперсных примесей за счет введения в них источников ультразвуковых колебаний.

V. БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-369.2011.8 «Разработка и исследование мелкодисперсных распылителей вязких жидкостей на основе новых физических принципов многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 688 с.
- [2] Страус В. Промышленная очистка газов/ Под ред. Ю.Я. Косога. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
- [3] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В., Гольх Р.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.
- [4] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В., Гольх Р.Н. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля // Ползуновский вестник – 2010. – № 3. – С. 303–309.
- [5] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V., Golyh R.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems// International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSGU, 2010. – P.328-333.
- [6] 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//
- [7] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В. Экспериментальное определение оптимальных режимов акустического воздействия для коагуляции мелкодисперсного аэрозоля // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С.183-187.
- [8] Дыгнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 2002. – 400 с.
- [9] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В., Цыганок С.Н., Хмелев М.В. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для повышения эффективности систем газоочистки// Вторая международная конференция «Пылегазоочистка-2009» 29–30 сентября 2009 г., Москва, ГК «Измайлово»: сборник докладов. – М.: ООО «ИНТЕРЭКО». – С. 97–101.
- [10] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Шалунова К.В. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах// Химическая техника.– 2010. – №1. – С. 23–28.
- [11] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В. Ультразвуковая коагуляционная камера для работы в агрессивных средах// Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр./науч.ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафонов; отв. за вып.: А.А. Левицкий. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009.– С.232–235.
- [12] Хмелев В.Н., Шалунова К.В., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – 228 с.