

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ КОАГУЛЯЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова
Бийский технологический институт АлтГТУ, г. Бийск

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных режимов акустического воздействия при коагуляции аэрозолей с размером частиц менее 10 мкм. В качестве источников ультразвуковых воздействий использовались 4 пьезоэлектрические колебательные системы, характеризующиеся различными техническими характеристиками. В результате проведенных исследований установлено, что оптимальным для коагуляции аэрозоля с размером частиц менее 10 мкм является воздействие ультразвуковыми колебаниями в диапазоне частот более 20 кГц при уровне звукового давления свыше 130 дБ.

Ключевые слова: аэрозоль, коагуляция, частота, уровень звукового давления.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) коагуляция представляет собой процесс сближения и укрупнения, взвешенных в газе или жидкости мелких твердых частиц, жидких капелек и газовых пузырьков под действием акустических колебаний звуковых или ультразвуковых частот. Способность звуковых колебаний вызывать укрупнение мельчайших частиц, взвешенных в воздухе, была обнаружена еще на раннем этапе изучения мощного ультразвука [1-3]. Преимуществами ультразвуковой коагуляции являются: возможность улавливать частицы с размером менее 1 мкм; взрыво- и пожаробезопасность; применимость к агрессивным средам; возможность работы при высоких температурах и давлениях.

Исследования, проведенные в прошлом столетии, в Англии, Германии, Советском Союзе, США [4-6] подтвердили интенсифицирующее воздействие звука на пыле-туманоулавливание, и это стимулировало интерес к промышленному применению ультразвуковой коагуляции.

Однако, отсутствие достаточного количества достоверных опытных данных и теоретических выводов по установлению оптимальных акустических режимов воздействия, а также дороговизна эксплуатации акустического оборудования и низкий КПД ультразвуковых излучателей оказали отрицательное влияние и помешали внедрению акустического метода газоочистки в промышленных условиях.

Сейчас акустическая обработка вновь приобретает актуальность, что обусловлено созданием мощных источников ультразвуковых колебаний.

Поэтому, большее значение приобретает задача обеспечения максимальной эффективности

процесса ультразвуковой коагуляции. Проведенный анализ показал, что при реализации процесса УЗ коагуляции наибольшие трудности возникают при определении режимов акустического воздействия, при которых частицы аэрозоля будут наиболее эффективно колебаться и агрегироваться. Это объясняется существованием множества факторов (частота, уровень звукового давления), оказывающих влияние на эффективность процесса коагуляции. Установление взаимосвязи между указанными параметрами и эффективностью процесса коагуляции позволит определить оптимальные режимы и условия УЗ воздействия на различные аэрозоли.

Теоретическое исследование процесса акустической коагуляции, направленное на определение оптимальных режимов акустического воздействия, рассматривалось в ряде работ [7-9]. Были установлены оптимальные условия коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (размер частиц менее 10 мкм), а именно:

- оптимальная частота коагуляции для аэрозолей с размерами частиц 5 мкм и менее лежит в области ультразвуковых частот;
- при размерах аэрозольных частиц 9 мкм и более оптимальная частота лежит в пределах слышимого диапазона.

В обоих случаях необходимо обеспечивать акустическое воздействие с уровнем звукового давления не менее 130 дБ, поскольку эффект ультразвуковой коагуляции наиболее явно проявляется при превышении данного значения.

В связи с этим, возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований, направленных на подтверждение оптимальности теоретически выявленных режимов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Выявленные в работах [7-9] оптимальные режимы акустического воздействия позволили сформулировать требования к ультразвуковым излучателям: для эффективной коагуляции аэрозолей акустическое воздействие должно осуществляться с частотой колебаний более 20 кГц (т.е. в ультразвуковом диапазоне частот) и уровнем звукового давления не менее 130 дБ.

Одним из возможных излучателей, способным обеспечивать ультразвуковое воздействие в выявленных режимах, является пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система (УЗКС).

Конструкция УЗКС, разработанной в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института АлтГТУ, схематично показана на рис. 1.

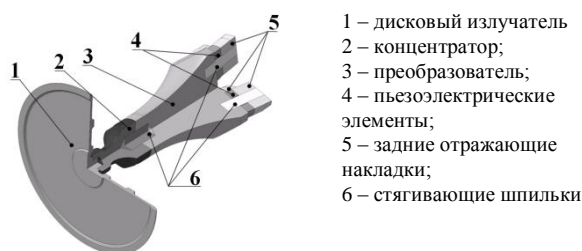


Рис. 1. Трехполуволновая УЗКС с дисковым излучателем

Представленная конструкция УЗКС состоит из двухполуволнового преобразователя 3-5, полуволнового концентратора 2, дискового излучателя 1 [10-12].

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на определение эффективности ультразвуковой коагуляции, было использовано 4 УЗКС, технические характеристики используемых систем приведены в табл. 1.

Табл. 1. 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 разнообразие условий проведения экспериментов. Для сравнительного воздействия в звуковом диапазоне частот был использован газоструйный излучатель: частота 10 кГц; уровень звукового давления 135 дБ.

Для проведения исследований была использована специальная экспериментальная установка, эскиз которой показан на рис. 2.

Для подтверждения теоретически выявленных в работах [7-9] режимов ультразвукового воздействия был проведен ряд экспериментов, заключавшихся:

1) в определении зависимости эффективности процесса коагуляции аэрозолей с различной дисперсной фазой от частоты воздействия;

2) в определении зависимости эффективности процесса ультразвуковой коагуляции аэрозолей с различной дисперсной фазой от уровня звукового давления.

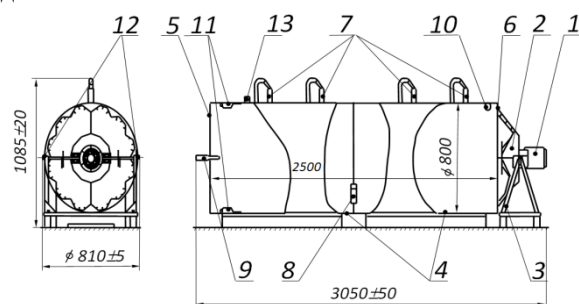


Рис. 2. Эскиз экспериментальной установки

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. 2.

Табл. 2. 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

Первым этапом было определение зависимости эффективности процесса коагуляции аэрозолей от частоты воздействия. Отбор проб

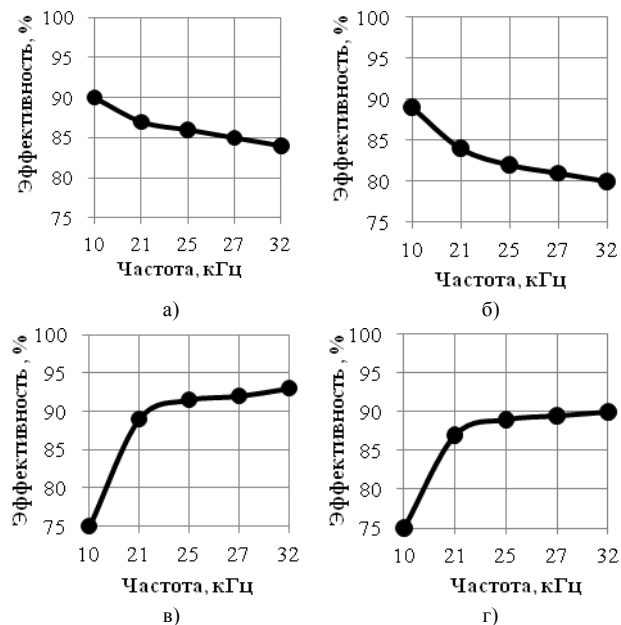
осуществлялся через 6 минут. Эффективность (степень осаждения) ультразвуковой коагуляции рассчитывалась по формуле [13]:

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

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

При исследовании влияния частоты колебаний на эффективность процесса УЗ коагуляции уровень звукового давления поддерживался постоянным и составлял 130 дБ (при этом значении уровня звукового давления эффект ультразвуковой коагуляции становится заметным, на низкой частоте колебания более высокого уровня опасны для здоровья). Начальная концентрация аэрозоля поддерживалась постоянной от опыта к опыту и равной 4 г/м³.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, приведены на рис. 3.



а) – аэрозоль водный № 1; б) – известковая пыль; в) – аэрозоль водный № 2; г) – мучная пыль

Рис. 3. Зависимость эффективности коагуляции аэрозоля от частоты звуковых колебаний

Из зависимостей, приведенных на рис. 3.а, б, видно, что для аэрозолей с размером частиц 5-10 мкм с увеличением частоты акустического воздействия происходит незначительное снижение эффективности ультразвуковой коагуляции (на 6–9%). Исходя из полученных результатов, для обеспечения наибольшей эффективности коагуляции аэрозолей с таким размером частиц необходимо использовать акустическое воздействие с частотой до 10 кГц.

Однако применение акустических колебаний частоты в 10 кГц при высоком уровне звукового давления связано с опасностью для здоровья человека и необходимостью дополнительной звукоизоляции технологического оборудования, что во многих случаях невозможно. Поэтому с точки зрения обеспечения безопасности процесса коагуляции аэрозолей с размером частиц 5-10 мкм, более целесообразно использовать частоты, относящиеся к нижней границе ультразвукового диапазона, хоть это и вызывает незначительное снижение эффективности процесса.

В то же время, анализ зависимостей, приведенных на рис. 3 в, г, показал, что для аэрозолей с размером частиц 1–5 мкм степень осаждения значительно возрастает с увеличением частоты воздействия. При этом наиболее существенное увеличение степени осаждения аэрозолей (на 12–14%) происходит при повышении частоты до 25 кГц. Дальнейшее увеличение частоты до 32 кГц вызывает незначительное увеличение эффективности (в среднем на 1–2%). В целом повышение частоты акустического воздействия с 10 кГц до 32 кГц позволило увеличить эффективность коагуляции аэрозолей более чем на 15–18 % при равном уровне звукового давления.

Следующим этапом экспериментов было определение зависимости эффективности процесса ультразвуковой коагуляции аэрозолей от уровня звукового давления. При проведении эксперимента использовалась УЗКС 420, обеспечивающая максимальный уровень звукового давления. Выбор УЗКС с частотой колебаний 27 кГц при проведении эксперимента обусловлен следующим: 27 кГц является средней частотой из имеющегося диапазона частот, и применяемые для проведения исследований аэрозоли достаточно эффективно коагулируют на этой частоте.

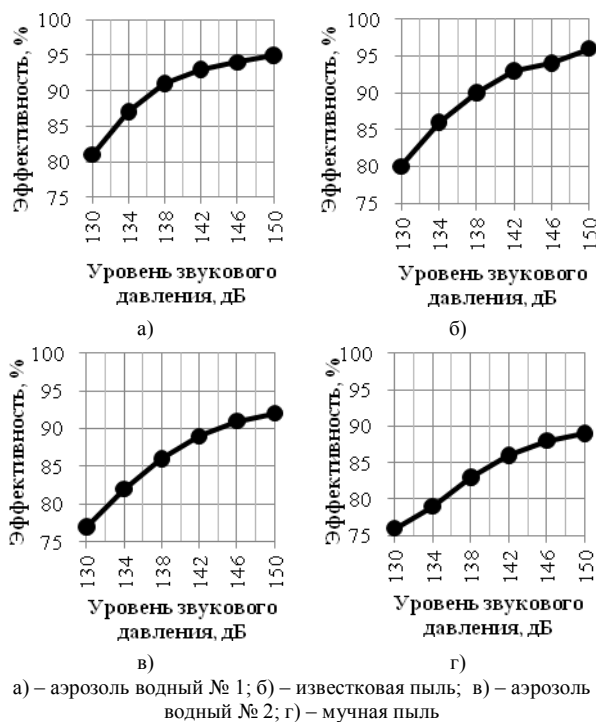
При проведении экспериментов «точкой начального отчета» было выбрано значение уровня звукового давления в 130 дБ. Уровень звукового давления изменялся ступенчато с шагом 4 дБ и контролировался шумомером ультразвукового частотного диапазона. Максимальное значение уровня звукового давления, для которого производились эксперименты, равнялось 150 дБ. Это ограничение является конструктивным пределом дискового излучателя, превышение которого ведет к поломке УЗКС. Эффективность ультразвуковой коагуляции определялась по формуле (1). Во всех проводимых экспериментах начальная концентрация аэрозолей равнялась 4 г/м³. Отбор проб проводился через 4 мин после начала эксперимента.

Результаты эксперимента приведены на рис.4.

Из приведенных на рис. 4 зависимостей следует, что при постепенном увеличении уровня звукового давления с 130 до 150 дБ эффективность ультразвуковой коагуляции увеличивается. Так, эффективность ультразвуковой коагуляции для аэрозолей с размером частиц 5–10 мкм при минимальном уровне звукового давления составила около 80 %, а при максимальном уровне звукового давления – 95 %. Таким образом, увеличение уровня звукового давления на 20 дБ позволило повысить эффективность на 15 %. Для аэрозолей с размером частиц 1–5 мкм увеличение уровня звукового давления на 20 дБ позволило увеличить эффективность коагуляции на 13–15%.

Однако при приближении значения уровня звукового давления к 150 дБ рост эффективности замедляется. Поэтому экстраполируя полученные зависимости в область более высоких уровней звукового давления, можно предположить, что в диапазоне 160–170 дБ существует оптимальное значение звукового давления, превышение которого уже не приведет к дальнейшему заметному росту эффективности коагуляции и будет энергетически не выгодно.

Для демонстрации данного предположения были проведены дополнительные исследования с помощью фокусирующего излучателя (уровень звукового давления в фокусе составляет более 165 дБ). В качестве коагулируемого аэрозоля использовался аэрозоль водный размером частиц 2–5 мкм.

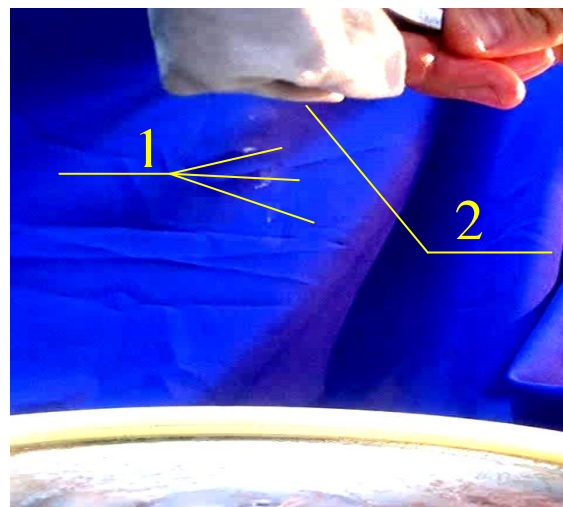


а) – аэрозоль водный № 1; б) – известковая пыль; в) – аэрозоль водный № 2; г) – мучная пыль

Рис. 4. Зависимость эффективности коагуляции аэрозоля от

уровня звукового давления

На рис.5 представлена фотография, отражающая процесс коагуляции аэрозоля при использовании фокусирующего излучателя.



1 – агрегаты, образовавшиеся в процессе УЗ коагуляции; 2 – диспергирование образовавшихся коагулянтов

Рис. 5. Процесс коагуляции аэрозоля в ультразвуковом поле с уровнем звукового давления свыше 165 дБ

Из представленного рис. 5 видно, что наряду с коагуляцией аэрозоля происходит и дополнительное диспергирование коагулируемой жидкости, то есть происходит одновременное образование и разрушение агрегатов частиц. Это подтверждает бессмысленность и энергетическую невыгодность применения для коагуляции аэрозолей уровня звукового давления свыше 160 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований впервые была подтверждена эффективность процесса акустической коагуляции аэрозолей с различной дисперсной фазой в ультразвуковом диапазоне частот. Проведенные исследования подтвердили правильность теоретических исследований, результаты которых представлены в работах [7-9].

В ходе исследований установлено следующее:

1) для аэрозолей с размером частиц 5 мкм и более оптимальным режимом коагуляции является воздействие акустическими колебаниями с частотой в диапазоне 21–25 кГц, а для аэрозолей с размером частиц 1–5 мкм с частотой более 25 кГц;

2) повышать частоту воздействия выше 27 кГц для аэрозолей микрометрового размера частиц не эффективно по причине малого относительного прироста эффективности и значительного возрастания энергетических потерь в излучателе;

3) при приближении значения уровня звукового давления к 150 дБ рост эффективности коагуляции аэрозолей замедляется. Это позволило предположить, что в диапазоне 160–170 дБ существует оптимальное значение уровня звукового давления, превышение которого уже не приведет к дальнейшему заметному росту эффективности коагуляции. Проведенный эксперимент показал, что повышение уровня звукового давления свыше 165 дБ приводит к кавитационному распылению жидкостных аэрозолей и (или) разрушению конгломератов объединившихся частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст] / Х. Грин; пер. с англ. Н. А. Фукса. – Л.: Химия, 1972. – 428 с.
2. Фукс, Н. Механика аэрозолей [Текст] / Под. ред. Б.В. Дерягин. – М.: Издательство академии наук СССР, 1955. – 352 с.
3. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии [Текст] / М.Я. Юдашкин. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
4. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 688 с.
5. Швыдкий В.С. Очистка газов [Текст] / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
6. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / Под ред. Ю.Я. Косого. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
7. Хмелев, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.
8. Хмелев, В.Н. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 303–309.
9. Khmelev, V.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golyh, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.
10. 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 [Текст] // Современные проблемы технической химии. Материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции, 2009. Секции 5-7. С. 21 – 26
11. 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
12. Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки, – 2010, – Вып.1 – С.148–153.
13. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии [Текст]. В 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400 с.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО 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) ГОУВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Шалунова Ксения Викторовна – аспирант кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ, тел. (3854)435323, e-mail: shkv@bti.secna.ru.