

## КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НАНОМЕТРОВОГО РАЗМЕРА

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, М.В.Хмелев, А.Н. Галахов,  
Р.Н. Голых

В статье представлены результаты исследований по определению эффективности ультразвуковой коагуляции готового нанодispersного продукта. Созданный измерительный стенд позволил контролировать изменение концентрации наночастиц за счёт их укрупнения при наложении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

**Ключевые слова:** акустическое воздействие, наноаэрозоль, коагуляция наночастиц, наноматериал

### Введение

В различных отраслях промышленности реализуются технологические процессы, сопровождающиеся формированием в газовых средах готового продукта в виде частиц нанометрового размера. Ярким примером подобного процесса является получение нанодispersного диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ .

При этом возникает задача высокоэффективного улавливания частиц готового продукта из газовых сред. Для улавливания готового продукта применяются аппараты сухой и мокрой пылеочистки, осадительные камеры, различные циклоны, электро и тканевые фильтры и др.

Наибольшее распространение в настоящее время получили инерционные и центробежные аппараты. Их эффективность при улавливании частиц с размерами до 1 мкм подтверждена широчайшим опытом промышленного применения. Однако, улавливание частиц с размерами менее 0,1 мкм в инерционных аппаратах оказывается малоэффективным.

Перспективным направлением увеличения эффективности улавливания нанодispersных примесей диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  является их предварительная коагуляция в акустических полях высокой интенсивности [1].

Ультразвуковая коагуляция представляет собой процесс сближения и укрупнения, взвешенных в газе или жидкости мелких твёрдых частиц, жидких капелек и газовых пузырьков под действием акустических колебаний звуковых или ультразвуковых частот [2].

В связи с отсутствием достоверных данных возникла необходимость в проведении исследований по определению эффективности процесса ультразвуковой коагуляции

диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  (Аэросил). При проведении исследований было учтено следующее:

– при производстве диоксида кремния необходимо улавливать из газовой среды частицы, которые имеют нанометровый размер;

– частицы аэросила в значительной степени самопроизвольно агломерируют, поскольку диоксид кремния обладает сильно выраженными адгезионными свойствами [3];

– агломераты частиц имеют размер от 1 до 10 мкм и представляют собой пористый материал. Плотность агломератов принимается равной насыпной плотности уплотнённого диоксида кремния, равной  $50 \text{ г/дм}^3$ . При этом размер наименьших частиц аэросила составляет 50...60 нм, обладающих плотностью, равной  $2200 \text{ кг/м}^3$ ;

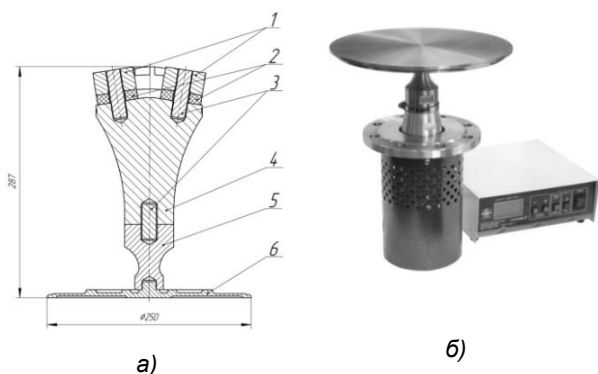
Для экспериментальных исследований процесса ультразвуковой коагуляции была использована ультразвуковая колебательная система (устройство и внешний вид показаны рисунке 1) с излучателем, выполненным в виде изгибно-колеблющегося диска. Излучатель имел следующие технические характеристики:

- диаметр 320 мм;
- рабочая частота 21,5 кГц. [4]

Для наглядного подтверждения возможности коагуляции наночастиц был проведён эксперимент (рисунок 2), заключающийся в воздействии УЗ колебаниями в режиме стоячей волны.

В ходе эксперимента агломерация частиц происходила за 1...2 секунды ультразвукового воздействия. При этом, полученные агломераты располагались в узлах стоячей волны и имели форму дисков, условный диаметр которых достигает 5 мм, а

толщина 1 мм. К сожалению, получившиеся агрегаты обладают малой механической прочностью и при механическом воздействии легко диспергируются на более мелкие частицы.



а) – конструктивная схема; б) – внешний вид  
 1 – задние отражающие накладки,  
 2 – пьезоэлектрические элементы,  
 3 – стягивающие шпильки,  
 4 – преобразователь, 5 – концентратор,  
 6 – дисковый излучатель

Рисунок 1 – УЗКС с двухполуволновым преобразователем и дисковым излучателем



Рисунок 2 – Коагуляция наночастиц в стоячей волне

Полученные предварительные результаты подтвердили возможность и показали целесообразность коагуляции частиц под воздействием ультразвуковых колебаний.

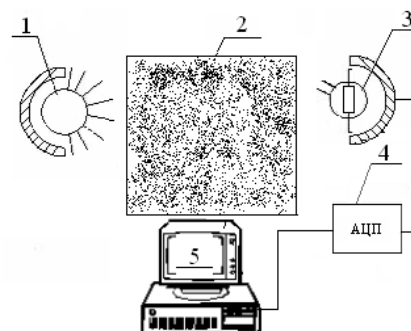
Исследования процесса коагуляции проводились в лабораторной коагуляционной камере цилиндрической формы длиной 2500 мм и диаметром 800 мм (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид лабораторной коагуляционной камеры

Важнейшим контролируемым параметром, характеризующих газодисперсную взвесь частиц диоксида кремния, является средний условный диаметр частиц. Этот параметр позволяет оценить эффективность улавливания частиц и определить степень повышения эффективности при наложении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Для определения относительного увеличения среднего диаметра частиц SiO<sub>2</sub> при коагуляции разработан измерительный стенд, структурная схема которого показана на рисунке 4.



1 – источник света, 2 – камера, заполненная частицами диоксида кремния,  
 3 – фоторезистор, 4 – аналогово-цифровой преобразователь, 5 – персональный компьютер

Рисунок 4 – Структурная схема измерительного стенда для определения плотности аэрозоля

В состав стенда входит точечный источник для формирования узкого светового пучка (светодиодный лазер), фотоприемник (фоторезистор серии ФСК) [5] и цифровой мультиметр типа UT60F с АЦП, обеспечивающий ввод посредством интерфейса RS-232 и обработку полученной информации с помощью приложения UT60F Interface Program.

Анемометр Kimo LV-110 обеспечивал измерение скорости воздушных потоков, создаваемых вентилятором, а также стационарных акустических течений, возникающих в ходе работы ультразвукового дискового излучателя.

Для измерения уровня звукового давления в лабораторной коагуляционной камере использовался анализатор шума и вибраций «Ассистент». При измерениях было установлено, что излучатель при 100% мощности электронного генератора позволяет создавать уровень звукового

## КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НАНОМЕТРОВОГО РАЗМЕРА

давления 140...145 дБ в большей части объема коагуляционной камеры.

Возможность регулировки мощности электронного генератора позволяет оценить степень повышения эффективности улавливания частиц SiO<sub>2</sub> в зависимости от уровня звукового давления.

Распыление частиц SiO<sub>2</sub> производилось через отверстие расположенное в верхней части торца камеры. При этом ультразвуковой излучатель располагался по центру противоположного торца. Измерения массы порошка SiO<sub>2</sub>, предназначенного для распыления, показали, что начальная массовая концентрация SiO<sub>2</sub> в коагуляционной камере составляла от 52 до 57 г/м<sup>3</sup>.

При выполнении исследований и обработке результатов учитывалось, что диаметр агломератов частиц связан с их счётной концентрацией, в то время как счётная концентрация частиц может быть определена по коэффициенту затухания светового потока, проходящего через аэрозоль.

Согласно результатам моделирования с использованием уравнения Смолуховского [6], укрупнение частиц аэросила происходит главным образом в начальный период воздействия. Поэтому можно считать, что в течение практически всего времени эксперимента счётная концентрация зависит от времени следующим образом:

$$n_k = n_{k0} e^{-\alpha_k t}, \quad \alpha_k = v(a_k) \frac{S}{V} \quad (1)$$

где  $v(a_k)$  – скорость гравитационного осаждения частицы с размером  $a_k$  (к-меры),  $S$  – площадь поверхности осаждения,  $V$  – суммарный объём осаждаемых частиц,  $n_{k0}$  – концентрация к-мер сразу после укрупнения под воздействием УЗ.

Зависимость скорости гравитационного осаждения от размера частицы определяется на основании 2-го закона Ньютона с учётом действия сил Осеена. При этом отношение диаметров частиц с УЗ воздействием и без него определяется следующим образом:

$$\frac{a_{c \text{ уз}}}{a_{\text{без уз}}} = \frac{a_{c \text{ уз}} \left( v_{\text{без уз}}(a_{\text{без уз}}) \frac{\alpha_{c \text{ уз}}}{\alpha_{\text{без уз}}} \right)}{a_{\text{без уз}}} \quad (2)$$

где  $\alpha_{c \text{ уз}}$  и  $\alpha_{\text{без уз}}$  – показатели экспоненты в зависимостях концентраций от времени (1) с УЗ воздействием и без него, которые определяются путём аппроксимации экспериментальных зависимостей

счётных концентраций частиц методом наименьших квадратов (МНК).

Начальный размер частиц установлен на основании результатов отбора проб и соответствовал 1 мкм. Таким образом, предложенная методика позволяет оценить условный диаметр агломератов, образовавшихся в результате ультразвукового воздействия, при известных концентрациях частиц, при наличии УЗ воздействия и без него.

Поскольку концентрация частиц связана с величиной поглощения света в аэрозоле [7], используется метод измерения дисперсного состава частиц, основанный на измерении сопротивления фоторезистора, регистрирующего излучение после прохождения луча светодиодного лазера сквозь газодисперсную систему, содержащую взвешенные частицы SiO<sub>2</sub>.

В результате анализа проб, полученных в разные моменты времени установлено, что для большинства известных зависимостей [8] (определяются природой аэрозоля) коэффициента экспоненциального поглощения света  $\alpha$  от их размеров частиц,

величина  $\frac{\alpha}{N_c}$  ( $N_c$  – суммарная счётная

концентрация частиц) варьируется в пределах 5%. Поэтому является справедливым следующее выражение для счётной концентрации частиц SiO<sub>2</sub>:

$$N_c = \frac{2}{C(\lambda)L} \ln \left( \frac{R}{R_0} \sqrt{\frac{I_{\lambda}}{I_0}} \right), \quad (3)$$

где  $C(\lambda)$  – постоянная величина, независящая от размера частиц [8].

Это выражение используется для обработки экспериментальных данных.

На основании полученных значений счётной концентрации рассчитывается степень укрупнения частиц с использованием выше описанной методики.

На фото (рисунок 5) представлен внешний вид внутренней поверхности коагуляционной камеры после естественного осаждения частиц и после УЗ коагуляции. Как следует из представленных фото, при отсутствии УЗ воздействия аэросил осаждался большей частью в нижней части коагуляционной камеры (рисунок 5, а). При наличии УЗ воздействия наблюдается значительное налипание частиц на все внутренние поверхности камеры (рисунок 5, б). Представленные фото позволяют сделать вывод, что, наложение УЗ колебаний уве-

личивает адгезионную способность частиц аэросила.



а) при естественном осаждении частиц аэросила



б) при УЗ коагуляции частиц аэросила

Рисунок 5 – Фото поверхности внутренней области коагуляционной камеры

Проведенные в ходе исследований измерения показали, что при работе дискового излучателя в объеме коагуляционной камеры за счет радиационного давления создаются потоки со средней скоростью порядка 0,5...0,6 м/с.

Для обеспечения идентичных условий проведения экспериментов (естественное осаждение и осаждение при УЗ воздействии), в коагуляционной камере был установлен вентилятор.

На рисунке 6 приведены зависимости счётной концентрации аэрозольных частиц от времени УЗ воздействия, полученные на основании измерений светового потока. При наличии дополнительных воздушных потоков со скоростью 0,6 м/с и УЗ воздействия наблюдается уменьшение времени осаждения частиц до 1,8 раз (на 44 %) в сравнении с естественным осаждением. Это соответствует 3,26-кратной степени укрупнения по условному диаметру и 35-кратной степени укрупнения по массе.

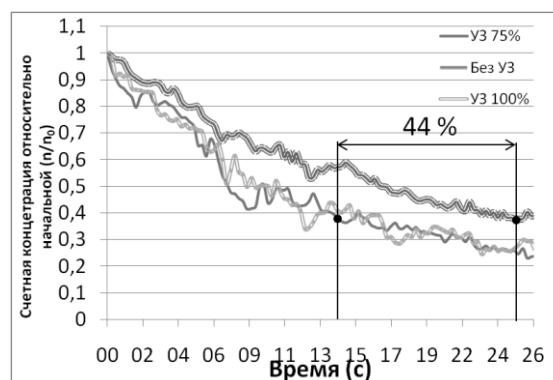


Рисунок 6 – Зависимости относительной счётной концентрации частиц SiO<sub>2</sub> от времени с воздушными потоками со скоростью до 0,6 м/с.

Т.к. в центробежных аппаратах газовые потоки движутся с гораздо большими скоростями, был исследован процесс коагуляции частиц при скорости потоков воздуха в коагуляционной камере до 5 м/с.

На рисунке 7 приведены зависимости относительной счётной концентрации частиц от времени в потоках воздуха со скоростью до 5 м/с при различных мощностях УЗ воздействия (80% и 100%).

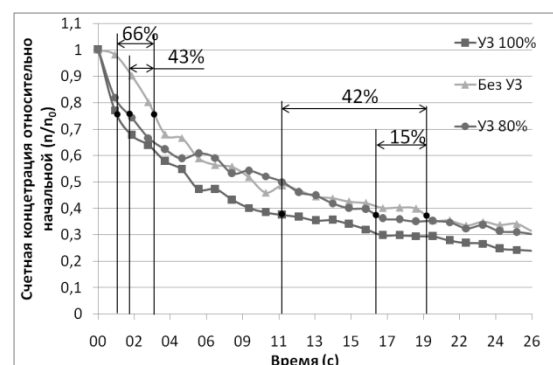


Рисунок 7 – Зависимости относительной счётной концентрации частиц SiO<sub>2</sub> от времени с воздушными потоками со скоростью до 5 м/с.

В ходе проведения исследования установлено, что процесс УЗ коагуляции можно условно разделить на два этапа. Первый этап происходит быстро. Согласно графикам при высокой концентрации в потоке воздуха со скоростью до 5 м/с воздействие на взвешенные частицы ультразвуковыми колебаниями происходит в первые две секунды как при 80% мощности, так и при 100% мощности. Воздействие УЗ колебаниями приводит к 1,73-кратному повышению эффективности осаждения частиц SiO<sub>2</sub> (на 43%). При этом степень укрупнения –

## КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НАНОМЕТРОВОГО РАЗМЕРА

3,2-кратная по условному диаметру и 33-кратная по массе).

Второй этап происходит при меньшей концентрации большее время. Установлено, что в потоке воздуха со скоростью до 5 м/с ультразвуковое воздействие с уровнем звукового давления 135...142 дБ эффекта практически не даёт. Время осаждения сокращается всего в 1,18 раз, т.е. примерно на 15%, а частицы укрупняются в 1,09 раз. Это обусловлено низкой концентрацией, малой плотностью частиц, низкой прочностью образовавшихся агрегатов и недостаточным уровнем звукового давления. При ультразвуковом воздействии с уровнем 145 дБ происходит 1,73-кратное повышение эффективности осаждения частиц SiO<sub>2</sub> (на 42%, а степень укрупнения – 3,2-кратная по условному диаметру и 33-кратная по массе). При более высокой исходной концентрации, соответствующей 200 г/м<sup>3</sup>, достигается более высокая степень укрупнения (до 6-ти раз).

### Заключение

В результате проведенных работ в получены следующие результаты:

Предложен, разработан экспериментальный измерительный стенд и создана методика контроля, позволившие провести экспериментальные исследования процесса ультразвуковой коагуляции частиц оксида кремния под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Проведенные измерения дисперсного состава контролируемых частиц позволили установить, что степень укрупнения частиц оксида кремния при воздействии ультразвуковых колебаний с уровнем звукового давления 145 дБ возрастает в 3 раза по условному диаметру частиц в течение первых 2 секунд УЗ воздействия при концентрации 50 г/м<sup>3</sup> и до 6-ти раз при концентрации 200 г/м<sup>3</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В. Н. Ультразвуковое оборудование для интенсификации химико-технологических процессов [Текст] / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, М. В. Хмелев, С.Н. Цыганок // Энциклопедия инженера-химика. - 2010. - № 6. - С.7-11.
2. Khmelev, V.N. Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media [Текст] / A.V. Shalunova, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev, S.S. Khmelev, N.V. Kuchin // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P. 267–270

3. Савченко, Н.С. Синтез и исследование свойств конструктивных и функциональных материалов на основе оксида кремния IV [Текст]. Автореферат диссертации канд. хим. наук. / Томск, 2008 г.

4. Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки, - 2010, - Вып.1 с.148-153

5. Аксененко, М.Д. Фоторезисторы / М.Д. Аксененко, Е.А. Красовский // «Элементы Радиоэлектронной Аппаратуры» Выпуск 27. – М.: Советское радио, 1973.

6. Хмелев, В.Н. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 303–309.

7. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен – М.: Мир. – 1986. – 662 с.

8. Sheng, C. D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method [Текст] / C.D. Sheng, X.L. Shen – J. Aerosol Sci. 37: 16–36, 2006. (in English)

**Хмелёв В.Н.** – д.т.н., профессор, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru);

**Шалунов А.В.** – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [shalunov@bti.secna.ru](mailto:shalunov@bti.secna.ru);

**Нестеров В.А.** – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [nva@bti.secna.ru](mailto:nva@bti.secna.ru);

**Хмелев М.В.** – инженер, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [maxx@bti.secna.ru](mailto:maxx@bti.secna.ru);

**Галахов А.Н.** – инженер, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [galakh@bti.secna.ru](mailto:galakh@bti.secna.ru);

**Голых Р.Н.** – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru).