

# ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ АГРЕГАТОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров, К.В. Шалунова, А.Н. Галахов**

*Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск*

В статье представлены результаты исследований процесса формирования агрегатов при ультразвуковой коагуляции частиц субмикронного размера. Результаты получены на основе математического моделирования поступательного и вращательного движения пары частиц под действием ультразвукового поля. Новизна предложенной модели заключается в учете особенностей обтекания сплошной средой частиц малых размеров (менее 1 мкм) при отклонении их формы от сферической. Полученные результаты позволят выработать технические требования к излучателям ультразвуковых колебаний для осуществления процесса коагуляции с максимальной эффективностью.

*Ключевые слова: ультразвук, коагуляция, аэрозоль, субмикронные частицы.*

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из последствий быстрого роста промышленности является заметное ухудшение состояния атмосферного воздуха. Технологические процессы различных отраслей промышленности сопровождаются выделением запыленных газовых выбросов, которые загрязняют окружающую среду, а во многих случаях затрудняют протекание технологического процесса и ухудшают качество конечного продукта.

Наряду с вредными выбросами, многие технологические процессы сопровождаются поступлением аэрозолей, которые содержат готовый продукт в виде дисперсных частиц субмикронного и нанометрового размера (получение конструкционных и функциональных наноматериалов, пищевая, химическая, горная промышленность). Поэтому не менее актуальной является необходимость создания технологии улавливания частиц готового продукта из газодисперсных систем.

Необходимость решения перечисленных проблем обуславливает актуальность исследований, направленных на создание оборудования для высокоэффективного улавливания субмикронных частиц из газодисперсных систем.

Наиболее эффективными из существующих пылеуловителей являются инерционные и центробежные аппараты, которые хорошо зарекомендовали себя при улавливании частиц в микронном диапазоне. Однако улавливание частиц в субмикронном диапазоне с использованием инерционных аппаратов оказывается малоэффективным.

Перспективным направлением увеличения эффективности улавливания субмикронных частиц является

их предварительная коагуляция в акустических полях высокой интенсивности.

Однако отсутствие системных теоретических и экспериментальных исследований, объясняющих механизм коагуляции дисперсных частиц в акустическом поле, не позволяет определить режимы воздействия (уровень звукового давления и частота), обеспечивающие максимальную эффективность процесса, на газодисперсные системы в зависимости от их характеристик (концентрация, дисперсный состав, скорость пылегазового потока).

Кроме того, существующие теории [1–6] не учитывают в полной мере особенности обтекания газовой средой частиц субмикронных размеров в акустическом поле, такие как:

- преобладание сил вязких напряжений из-за малых размеров частиц (менее 1 мкм);

- отклонение формы твёрдых частиц и их агрегатов от сферической, приводящее к их вращению.

Для решения поставленной задачи и исследования процесса коагуляции предложена и разработана модель взаимодействия двух частиц, которая позволяет выявить зависимость расстояния между частицами от времени при заданных начальных условиях (поперечный размер исходных частиц и отношение продольного размера к поперечному, начальное расстояние между частицами, частота и уровень звукового давления, плотность вещества частиц, угол между линией центров частиц и направлением распространения ультразвуковой волны) и установить:

- оптимальные режимы ультразвукового воздействия в зависимости от размеров и формы частиц;

- форму образуемых агрегатов.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ЧАСТИЦ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

В рамках разработанной модели возмущения скорости  $u$  и давления  $p$  среды, вызванные движением частиц, представляются в виде сумм составляющих 1-го и 2-го порядка малости ( $p_1, \mathbf{u}_1$  и  $p_2, \mathbf{u}_2$  соответственно):

$$p(\mathbf{r}) = p_1(\mathbf{r}) + p_2(\mathbf{r}); \quad \mathbf{u}(\mathbf{r}) = \mathbf{u}_1(\mathbf{r}) + \mathbf{u}_2(\mathbf{r}),$$

где  $\mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3)$  – вектор координаты точки газовой среды.

Составляющие 1-го порядка возмущений определяются на основании анализа уравнений Навье-Стокса для вязкого режима обтекания, который справедлив при малых размерах частиц [7], и представимы в виде мультипольных разложений [8]:

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^3 \left[ H_i^A \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{X_A} \right) + H_i^B \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{X_B} \right) \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[ H_{ij}^A \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{X_A} \right) + H_{ij}^B \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{X_B} \right) \right] + \dots$$

$$\eta u_i(\mathbf{r}) = -\frac{2}{3} \left( \frac{H_i^A}{X_A} + \frac{H_i^B}{X_B} \right) - \frac{3}{5} \sum_{j=1}^3 \left[ H_{ij}^A \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{X_A} \right) + H_{ij}^B \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{X_B} \right) \right] -$$

$$- \dots - \frac{1}{6} \sum_{j=1}^3 \left[ H_j^A \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{X_A} \right) X_A^2 + \right.$$

$$+ H_j^B \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{X_B} \right) X_B^2 \left. \right] -$$

$$- \frac{1}{10} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \left[ H_{jk}^A \frac{\partial^3}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \left( \frac{1}{X_A} \right) X_A^2 + \right.$$

$$+ H_{jk}^B \frac{\partial^3}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \left( \frac{1}{X_B} \right) X_B^2 \left. \right] + \dots$$

где  $X_A = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - x_{Ai})^2}$ ,  $X_B = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - x_{Bi})^2}$ ,  $x_{Ai}$  и  $x_{Bi}$  –  $i$ -ые координаты центров частиц  $A$  и  $B$  соответственно,  $H_i^A, H_{ij}^A, \dots, H_i^B, H_{ij}^B, \dots$  – постоянные величины, определяемые из граничных условий прилипания [2].

Составляющие 2-го порядка возмущений скорости и давления  $u_2$  и  $p_2$  соответственно определяются на основании анализа уравнений Осеена, справедливых при малых числах Рейнольдса для субмикронных частиц:

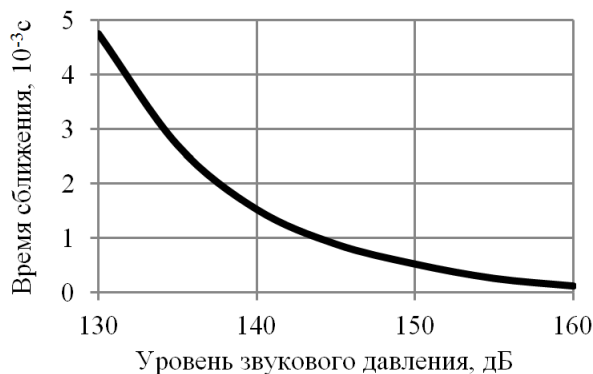
$$\text{div } \mathbf{u}_2 = 0$$

$$\rho(\mathbf{u}, \nabla) \mathbf{u}_2 = -\nabla p_2 + \eta \Delta \mathbf{u}_2,$$

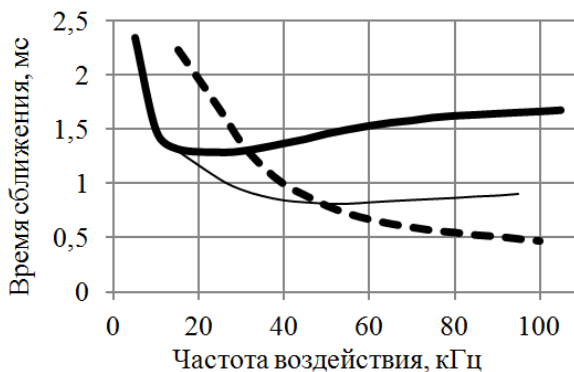
где  $\mathbf{u}$  – компонента скорости 1-го порядка малости, определённая на предыдущем этапе.

В результате анализа разработанной модели были получены зависимости времени сближения частиц (рис. 1) от режимов ультразвукового воздействия (уровень звукового давления и частота). Модельный диаметр частиц – 0,6 мкм, плотность вещества час-

тиц – 2200 кг/м<sup>3</sup> (SiO<sub>2</sub>), начальное расстояние между частицами – 10,75 мкм.



а) от уровня звукового давления



б) от частоты

**Рис. 1. Зависимости времени сближения частиц от режимов ультразвукового воздействия**

Представленные зависимости позволяют сделать вывод о необходимости использования уровней звукового давления от 150 дБ и более (рис. 1а). Оптимальная частота коагуляции для частиц размером 0,9 мкм составляет 20 кГц (рис. 1б). Для меньших размеров частиц требуется повышение оптимальной частоты воздействия до 100 кГц и более. Однако, поскольку ультразвуковые колебания в воздушной среде на частотах более 100 кГц затухают более чем на 5 дБ/м, оптимальным следует считать диапазон частот 20–70 кГц и уровень звукового давления – не менее 150 дБ. Выбранный диапазон обусловлен тем, что на частоте 70 кГц время сближения частиц с размером менее 0,3 мкм увеличивается не более чем на 15 % по сравнению с частотой 100 кГц.

Для определения формы образующихся агрегатов дисперсных субмикронных частиц были установлены зависимости скорости сближения первичных частиц от ориентации линии их центров к направлению распространения акустической волны (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость средней скорости сближения частиц от угла между линией центров частиц и волновым вектором акустического поля

Как следует из рис. 2, средняя скорость сближения частиц в зависимости от угла к направлению акустического поля изменяется практически линейно, т.е.  $v(r) \approx v_0(r) \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)$ , где  $r$  – расстояние между частицами, м.

Таким образом, на начальных стадиях коагуляции формируются частицы, форма которых в первом приближении представляет собой эллипсоид вращения, ориентированный вдоль поля.

Предполагаемая форма образуемого агрегата на начальной стадии коагуляции приведена на рис. 3.

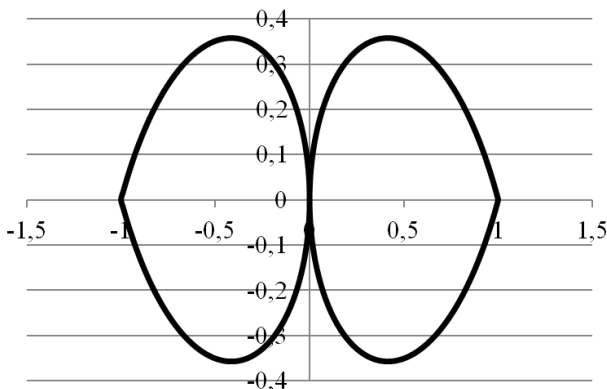


Рис. 3. Предполагаемая форма образуемого агрегата на начальной стадии коагуляции (значения координат на осях указаны в относительных единицах)

Оценки числа  $Re$  показывают, что уже при продольных размерах эллипсоида, равных 2 мкм, оно превышает 0,05. При таких значениях  $Re$  допущение об Осеевском режиме обтекания всё ещё является справедливым. Однако в работе [11] было отмечено, что под действием градиента скорости в возникающих стационарных акустических течениях наблюдается поворот эллипсоидов на некоторый угол относительно начальной ориентации. Это приводит к вращению частиц под действием акустического поля, кото-

рое учитывается в представленной модели, и значительно зависит от соотношения осей эллипсоида.

При дальнейших увеличениях размеров эллипсоидов до 200 мкм и более они окончательно ориентируются поперёк поля, что наблюдается экспериментально.

Поэтому исходя из зависимости скорости сближения от угла расположения, была проведена оценка соотношения продольных и поперечных размеров формируемого агрегата.

На начальной стадии коагуляции, когда частицы имеют сферическую форму, количество частиц, с которыми искомая частица сталкивается, является пропорциональным скорости сближения частиц, умноженной на телесный угол. Поэтому для определения количества частиц суммирование производится по всем возможным расстояниям от искомой частицы.

$$N(r)\Delta\Omega \approx \int_0^\infty n v_0(r) \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) r^2 \partial r = n \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \Delta\Omega \int_0^\infty v_0(r) r^2 \partial r,$$

где  $\Delta\Omega$  – малый телесный угол,  $sr$ ,  $n$  – счётная концентрация частиц в окрестности искомой частицы,  $m^3$ .

Отсюда получается, что локальный поперечный размер агрегата  $D(x)$  в зависимости от продольной координаты  $x$  определяется следующей зависимостью:

$$D(x) = L \left( \frac{\pi}{2} - \theta(x) \right) \sin \theta(x);$$

$$x = \frac{L}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \theta(x) \right) \cos \theta(x)$$

где  $L$  – продольный размер агрегата, м.

Поскольку изначально принято допущение о том, что частицы или агрегаты имеют форму эллипсоида вращения, поперечный диаметр эллипсоида определяется как максимальное значение функции  $D(x)$ , т.е. когда

$$\frac{\partial D}{\partial x} = 0$$

или

$$\frac{\partial D}{\partial \theta} = 0, \text{ т.е. } \frac{\partial D}{\partial \theta} = -\sin \theta + \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \cos \theta = 0. \quad (1)$$

Численное решение уравнения (1) показывает, что  $\theta \approx 40^\circ$ , что соответствует максимальному поперечному диаметру  $0,35 \cdot L$ . Это даёт возможность сделать предположение о том, что на начальной стадии коагуляции наиболее вероятное соотношение осей эллипсоида равно 2,8.

Поэтому дальнейший анализ модели двух частиц проводился для эллипсоидов вращения с соотношением осей  $S$  равном от 1 до 4.

На рис. 4 представлены зависимости расстояния между частицами от времени для случая эллипсоидов вращения с поперечным диаметром 0,5 мкм, изначально ориентированных под углом  $45^\circ$  к

направлению распространения ультразвуковой волны, при различных соотношениях длин полуосей.

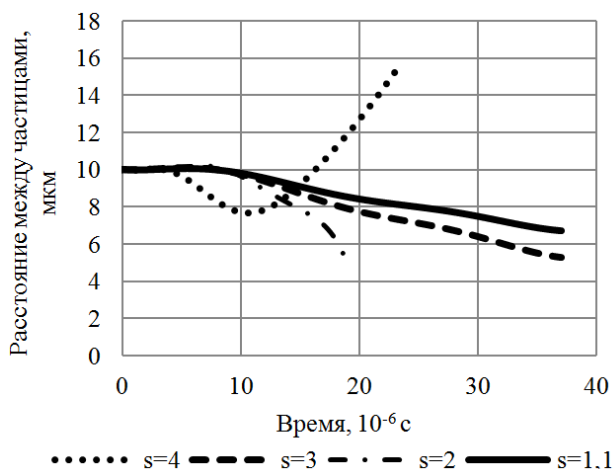


Рис. 4. Зависимости расстояния между центрами эллипсоидов вращения от времени для различных соотношения полуосей  $s$

Как следует из представленных зависимостей, при малом соотношении длин полуосей  $s$ , взаимодействие частиц является достаточно слабым. Существует оптимальное соотношение полуосей, при котором скорость сближения частиц минимальна. Дальнейшее увеличение отношения длин полуосей приводит к тому, что сила взаимодействия частиц уменьшается вплоть до отталкивания, начиная с некоторого  $s_{max} = 4$ . Это позволяет сделать вывод о том, что отношение продольных размеров эллипса к поперечным ограничено и не превышает 4.

Итоговая зависимость времени сближения частиц от соотношения полуосей, находящегося в диапазоне  $s$  от 1,1 до 3, при которых происходит сближение, приведена на рис. 5.

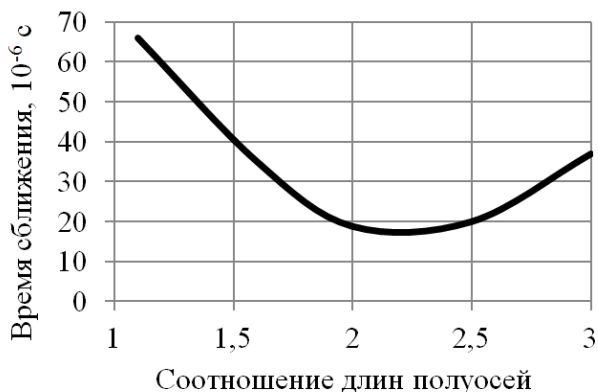


Рис. 5. Зависимость времени сближения частиц от отношения длин полуосей

Как следует из представленной зависимости, время сближения частиц, начиная с  $s = 2,2$ , увеличивается. Это свидетельствует о том, что чем больше отношение осей, тем в меньшей степени эллипсоидальные частицы агломерируют между собой.

Таким образом, итоговое соотношение длин полуосей стремится к значению  $s = 2,2$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований впервые комплексно изучен процесс коагуляции субмикронных частиц на микроуровне за счет воздействия акустическими колебаниями высокой интенсивности ультразвуковой частоты. Предложенная математическая модель поведения двух субмикронных частиц в акустическом поле впервые учитывает вращательное движение частиц и влияние вязкости газовой среды.

Анализ модели позволил выявить оптимальные режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие наименьшее время сближения частиц:

- наиболее эффективно процесс коагуляции субмикронных частиц происходит в диапазоне частот УЗ воздействия 20–70 кГц;

- уровень звукового давления должен составлять не менее 150 дБ.

Дальнейший анализ формы образующихся агрегатов позволил установить следующее:

- на начальных стадиях коагуляции образуемые агрегаты имеют форму, близкую к эллипсоиду вращения, ориентированы вдоль поля и имеют наиболее вероятное соотношение осей, равное 2,8;

- эллипсоидальные агрегаты под действием УЗ поля приводятся во вращательное движение, которое определяет основной механизм коагуляции частиц с формой, отличной от сферической;

- при дальнейшем увеличении размеров агрегатов (до 2–10 мкм) происходит их вращательное движение под действием УЗ поля, которое определяет основной механизм коагуляции, соотношение полуосей таких агрегатов составляет 2,8–4;

- на конечной стадии коагуляции крупные агрегаты (более 200 мкм) окончательно ориентируются поперёк поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-08-98092 р\_сибирь\_a.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д.Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
2. St. Clair, H.W.. Agglomeration of Smoke Fog or Dust Particles by Sonic Waves [Текст] / H.W. St. Clair // Industr. And Engineering Chem., 41,11,2434, 1949.
3. Konig, W. Hydrodynamische-akustische Untersuchungen [Текст]/ W. Konig // Ann. Phys. 42. – 1891. – pp. 549–553.
4. Lane, C.A. Acoustic Streaming in the Vicinity of a Sphere / C.A. Lane // JASA, 27, 6, 1082, 1955.
5. Komarov, S.V. Numerical simulation of acoustic agglomeration of dust particles in high temperature exhaust gas [Текст] / S.V. Komarov, M. Hirasawa. – Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, 10 p.
6. 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). – pp. 16–36.

7. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]. В X т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

8. Хмелёв, В.Н. Моделирование процесса коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелёв, А.В.Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – Липецк: ЛГТУ, 2010. – С. 48–52.

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

10. Khmelev, V.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 328–333.

11. Чернов Н. Н. Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов: Дис. д-ра техн. наук: 01.04.06: Таганрог, 2004 317 с. РГБ ОД, 71:05-5/470..

*Хмелёв Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru);*

*Шалунов Андрей Викторович – 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);*

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

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

*Шалунова Ксения Викторовна – к.т.н., начальник отдела аспирантуры, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: [shkv@bti.secna.ru](mailto:shkv@bti.secna.ru);*

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