

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДВУМЕРНОГО ПЕРЕКРЁСТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОАГУЛЯЦИИ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, А.А. Синкин, А.Г. Овчаренко

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

В статье представлены результаты численного исследования влияния перекрёстного ультразвукового поля на эффективность коагуляции частиц сложной формы. Актуальность данной работы особенно остро стоит для дымовых частиц, которые могут иметь произвольную форму и представляют опасность для людей при пожаре. Установлено наличие критического уровня звукового давления, начиная с которого вращающееся акустическое поле принципиально оказывает влияние на площадь сечения столкновения. Критический уровень звукового давления обусловлен, что при малых уровнях звукового давления агломерат ориентируется в равновесное положение – перпендикулярно каждому из направлений воздействующих плоских ультразвуковых волн. Введено понятие относительной завихренности акустического поля. Установлено, что с повышением относительной завихренности критический уровень звукового давления снижается. И для относительной завихренности 1 он составляет менее 180 дБ, а площадь сечения столкновения может быть увеличена до 2-х раз.

*Ключевые слова:* ультразвук, вращение, коагуляция, эффективность, модель.

## ВВЕДЕНИЕ

Все известные и реализуемые течения, возникающие в результате нелинейных искажений первичного синусоидального ультразвукового воздействия, являются эффектами, имеющими второй порядок малости [1–3]. Поэтому данные эффекты оказываются сопоставимы с первичным синусоидальным воздействием лишь при уровнях звукового давления в газовой фазе 180 дБ и выше. К сожалению, такие уровни звукового давления достигаются лишь в резонансных промежутках (с толщиной, не превышающей длину ультразвуковой волны – не более 20 мм в газовой фазе) или в зонах фокусировки, когда “пятно” фокуса также не превышает длину ультразвуковой волны. Поэтому необходим поиск новых подходов к реализации ультразвукового воздействия, позволяющих реализовать дополнительное вращательное движение газовой фазы (в малых масштабах вихрей с целью увеличения площади сечения столкновения частиц за счёт вращения).

В основном, все ранние исследования были направлены на изучение акустических течений 2-го порядка (Эккарта и Шлихтинга [4,5]), а вопросы формирования вращающихся векторных физических величин 1-го порядка, в основном, рассматривались лишь для электромагнитных полей (например, круговая поляризация электромагнитной волны, когда происходит вращение векторов электрического и магнитного поля, перпендикулярных направлению распространения электромагнитной волны). При этом

согласно открытым источникам, вращение 1-го порядка не рассматривалось для акустических полей. Поэтому для проведения исследований влияния вращающегося акустического поля 1-го порядка на эффективность процесса, первоначально было математически сформулировано определение такого поля. Математическое описание формального определения представлено в следующем разделе.

## ФОРМАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Базисной для формулировки определения вращающегося акустического поля первого порядка является отображение  $\mathbf{v}(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ ;  $\mathbf{v}(t) = \mathbf{u}(r, t)$ .

На базе данной функции вводятся понятия *сечения вращательного движения*  $S$  и *максимального сечения вращательного движения*  $S_{MAX}$ , определяемые для заданной плоскости проекции (определяемой базисными векторами  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ ) и равные

$$S = \mu \left\{ \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right\} \mid \exists t \in \mathbb{R}; s \in [0;1] \mid \alpha_i = s(\mathbf{v}(t), \mathbf{e}_i) \right\}; \quad (1)$$

$$S_{MAX} = \sup_{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \in \mathbb{R}^3; \|\mathbf{e}_1\| = \|\mathbf{e}_2\| = 1; (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = 0} \mu \left\{ \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right\} \mid \exists t \in \mathbb{R}; s \in [0;1] \mid \alpha_i = s(\mathbf{v}(t), \mathbf{e}_i) \right\}$$

$\mu$  – 2-мерная функция меры Лебега.

Так как эффекты, вносимые вращением вектора скорости акустического поля и колебанием звукового давления, линейно пропорциональны амплитуде звукового давления на больших расстояниях от

дисперсной частицы, дополнительно определена величина:

$$S_{MAX} = \frac{S_{MAX}}{\lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{4}{T} \int_0^T \|\mathbf{v}(t)\|^2 dt \right)} ; \quad (3)$$

которая обозначает относительную завихрённость акустического поля.

Вращающееся акустическое поле 1-го порядка особый эффект оказывает на частицы (как правило, представляющие собой агломераты сферических частиц), форма которых сильно отличается от сферической. Вращательное движение частицы описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка для матрицы поворота агломерата (4):

$$\begin{aligned} & \rho_p V_0 \sum_i \left( \mathbf{r}_i \times A^T \frac{d^2 A}{dt^2} \mathbf{r}_i \right) + \\ & + N \int_{V_0} \rho_p \left( \mathbf{s} \times A^T \frac{d^2 A}{dt^2} \mathbf{s} \right) dV = ; \quad (4) \\ & = \sum_i \mathbf{r}_i \times \left( A^T \int_{S_i} \mathbf{f}_i (\mathbf{A} \mathbf{r}_i + \mathbf{s}_i) dS \right) \end{aligned}$$

где  $\rho_p$  – плотность вещества агломерата, кг/м<sup>3</sup>;  $V_0$  – объём элементарной сферической частицы, входящей в состав агломерата, м<sup>3</sup>;  $A$  – матрица поворота агломерата в трёхмерном пространстве (размером 3x3);  $\mathbf{r}_i$  – вектор координат центра масс  $i$ -й элементарной сферической частицы, входящей в состав агломерата, м;  $N$  – количество элементарных сферических частиц, входящих в состав агломерата;  $\mathbf{f}_i$  – сила, действующая на поверхность элементарной сферической частицы, Н/м<sup>2</sup>.

Результаты определения относительного увеличения площади сечения столкновения на базе численного решения уравнения представлены на следующих рис. 1 и 2.

Расчёты проводились для частиц дыма (плотность вещества частиц 2000 кг/м<sup>3</sup>; протяжённости агломерата вдоль большей полуоси составляет 3 от диаметра наименьшей частицы, входящей в состав агломерата), находящихся в сплошной газовой фазе – воздух (температура 20°C; плотность 1,20 кг/м<sup>3</sup>; скорость звука 343 м/с, вязкость 18,2·10<sup>-6</sup> Па·с). Полученные тестовые зависимости вектора ориентации оси симметрии агломерата (является осью максимальной длины среди 3-х измерений) для различных относительных завихрённостей представлены на рис. 1.

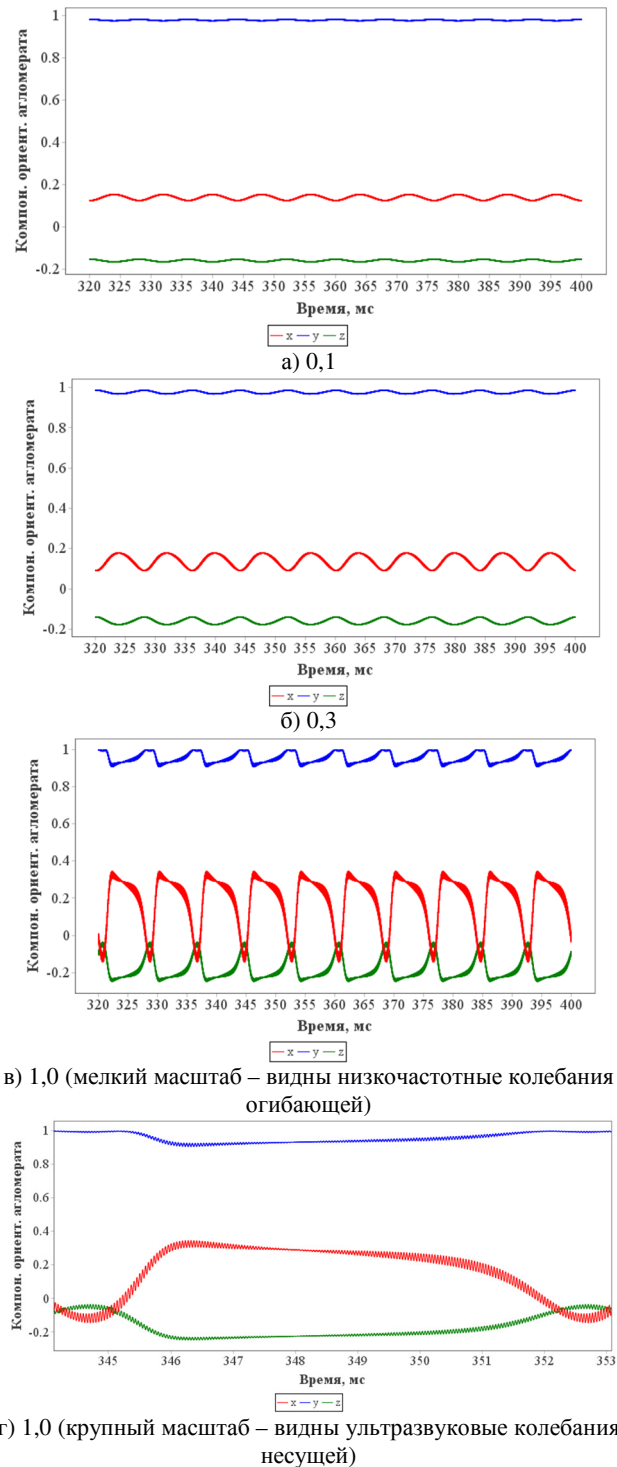


Рис. 1. Зависимости компонент вектора ориентации оси агломерата от времени при различных завихрёностях (уровень звукового давления 185 дБ)

Как видно из рис. 1, наличие относительной завихрённости ультразвукового поля приводит к локальным колебаниям, представляющим собой псевдовращение (возратно-поступательное вращение) наибольшей оси агломерата. При этом относительная

завихрённость ультразвукового поля 0,1 (когда колебательная скорость газа меняет только модуль и знак почти не меняя направление) вызывает очень малые смещения полуоси, много меньшие условного диаметра агломерата, что приводит к слабому изменению площади сечения столкновения. Гораздо более заметные смещения полуоси агломерата вызывает теоретически предельно достижимая относительная завихрённость, равная 1.

На следующем рис. 2 представлена зависимость относительного увеличения площади сечения столкновения от уровня звукового давления при различных относительных завихрённостях.

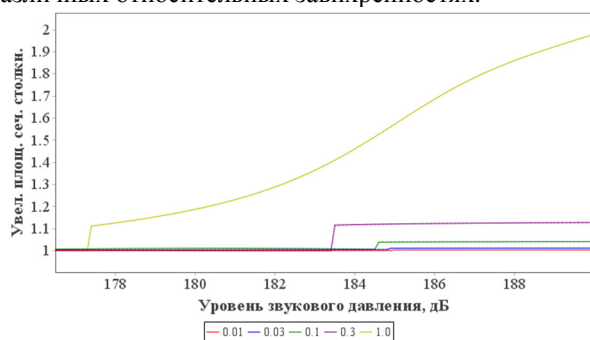


Рис. 2. Зависимость относительного увеличения площади сечения столкновения от уровня звукового давления при различных относительных завихрённостях

Представленный рис. 2 свидетельствует о наличии критического уровня звукового давления, начиная с которого вращающееся акустическое поле принципиально оказывает влияние на площадь сечения столкновения. Критический уровень звукового давления обусловлен тем, что при малых уровнях звукового давления агломерат ориентируется в равновесное положение – перпендикулярно каждому из направлений воздействующих плоских ультразвуковых волн. При этом с повышением относительной завихрённости критический уровень звукового давления снижается. И для относительной завихрённости 1 он составляет менее 180 дБ, а площадь сечения столкновения может быть увеличена до 2-х раз.

Полученные результаты подтверждают необходимость максимизации относительной завихрённости вращающегося акустического поля 1-го порядка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты численного исследования влияния перекрёстного ультразвукового поля на эффективность коагуляции частиц сложной формы. Установлено наличие критического уровня звукового давления, начиная с которого вращающееся

акустическое поле принципиально оказывает влияние на площадь сечения столкновения. Критический уровень звукового давления обусловлен тем, что при малых уровнях звукового давления агломерат ориентируется в равновесное положение – перпендикулярно каждому из направлений воздействующих плоских ультразвуковых волн. Установлена возможность увеличения площади сечения столкновения до 2-х раз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N. Three-dimensional numerical model of ultrasonic coagulation of PM2.5 aerosol particles in vortex acoustic flows // Theoretical foundations of chemical engineering. 2024. V. 58, No. 4. P. 980–992.
2. Wu J. Acoustic Streaming and Its Applications // Fluids. 2018. V. 4, Iss. 3. P. 108.
3. Khmelev V., Shalunov A., Golykh R. Mathematical Simulation of the Influence of Acoustic on the Efficiency of PM 2.5 Coagulation // Mathematics. 2023. Vol. 12, Iss. 11. P. 692.
4. Tang Q., Hu J., Qian S. et al. Eckart acoustic streaming in a heptagonal chamber by multiple acoustic transducers // Microfluid Nanofluid. 2017. V. 21, Iss. 28.
5. Gubaidullin D.A., Osipov P.P., Nasyrov R.R. Numerical simulation of Schlichting streaming induced by standing wave in rectangular enclosure // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 567. P. 012017.

Хмелёв Владимир Николаевич – заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432450, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., профессор, директор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432450, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Синкин Александр Андреевич – студент группы ПС-21, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: vip.sinkin@inbox.ru.

Овчаренко Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ.

# NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF A TWO-DIMENSIONAL CROSS ULTRASONIC FIELD ON THE EFFICIENCY OF COAGULATION OF COMPLEX PARTICLES

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.A. Sinkin, A.G. Ovcharenko

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk*

The article presents the results of a numerical study of the effect of a cross ultrasonic field on the efficiency of coagulation of particles of complex shape. The relevance of this work is especially acute for smoke particles, which can have any shape and pose a danger to people in case of fire. The presence of a critical sound pressure level has been established, starting from which the rotating acoustic field has a fundamental effect on the collision cross-sectional area. The critical sound pressure level is due to the fact that at low sound pressure levels, the agglomerate is oriented to an equilibrium position perpendicular to each of the directions of the plane ultrasonic waves acting. The concept of relative vorticity of the acoustic field is introduced. It has been found that with increasing relative vorticity, the critical sound pressure level decreases. And for relative vorticity 1, it is less than 180 dB, and the collision cross-sectional area can be increased up to 2 times.

Index terms: ultrasonic, rotation, coagulation, efficiency, model

## REFERENCES

1. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N. Three-dimensional numerical model of ultrasonic coagulation of PM2.5 aerosol particles in vortex acoustic flows // Theoretical foundations of chemical engineering. 2024. V. 58, No. 4. P. 980–992.
2. Wu J. Acoustic Streaming and Its Applications // Fluids. 2018. V. 4, Iss. 3. P. 108.
3. Khmelev V., Shalunov A., Golykh R. Mathematical Simulation of the Influence of Acoustic on the Efficiency of PM 2.5 Coagulation // Mathematics. 2023. Vol. 12, Iss. 11. P. 692.
4. Tang Q., Hu J., Qian S. et al. Eckart acoustic streaming in a heptagonal chamber by multiple acoustic transducers // Microfluid Nanofluid. 2017. V. 21, Iss. 28.
5. Gubaidullin D.A., Osipov P.P., Nasyrov R.R. Numerical simulation of Schlichting streaming induced by standing wave in rectangular enclosure // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 567. P. 012017.

*Khmelev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy Director for scientific work, Biysk Technological Institute, (3854)432450, e-mail: vnh@mail.ru.*

*Shalunov Andrey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Biysk Technological Institute, (3854)432450, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.*

*Sinkin Alexander Andreevich – student of PS-21 group, Biysk Technological Institute, e-mail: vip.sinkin@inbox.ru.*

*Ovcharenko Alexander Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Biysk Technological Institute.*