

# ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Р.Н. Голых<sup>1</sup>, А.Р. Барсуков<sup>1</sup>, С.Г. Ильясов<sup>2</sup>, Г.Т. Суханов<sup>2</sup>, Г.В. Пышноград<sup>3</sup>,  
Л.Ф. Комарова<sup>3</sup>, А.Н. Блазнов<sup>1</sup>, А.Г. Овчаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Статья посвящена исследованию механизмов взаимодействия микронных и субмикронных частиц в многофазных системах при быстрых динамических процессах (в том числе при ультразвуковом воздействии). Актуальность работы определяется ограничениями существующих методов, которые позволяют получать лишь статистические характеристики дисперсной фазы, не обеспечивая прямого измерения сил и динамики взаимодействия отдельных частиц. Рассмотрены методы скоростной киносъёмки и Particle Image Velocimetry для наблюдения движения частиц с высокой частотой кадров, а также оптические пинцеты, позволяющие фиксировать частицы в заданных положениях и задавать начальные условия эксперимента. Рассмотренные результаты демонстрируют возможность количественной оценки сил взаимодействия пар частиц, учёта влияния фазовых переходов, термокапиллярных эффектов и ультразвуковых воздействий. Проведённый обзор отечественных и зарубежных исследований подтвердил эффективность оптических пинцетов для анализа коагуляции, динамики и деформации дисперсных систем. Разработанные подходы могут быть использованы в физике коллоидов, биофизике, фармацевтике, химии и технологии полимеров.

*Ключевые слова:* многофазные системы, динамические процессы, поведение частиц, моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день поведение многофазных систем в динамических процессах (в частности, в быстропротекающих процессах) изучается, в основном с точки зрения изменения статистических характеристик ансамбля частиц дисперсной фазы (средний арифметический диаметр  $d_{10}$ , средний объёмный диаметр  $d_{30}$ , средний объёмно-поверхностный диаметр  $d_{32}$ , счётная концентрация, параметры релеевского и гамма-распределения частиц по размерам и т.д.) в системах как с несущей жидкой, так и с несущей газовой фазой.

Применяемые методы исследования статистических характеристик многофазных систем делятся на две большие группы:

1) методы, основанные на анализе коэффициентов пропускания зондирующего излучения сквозь ансамбль частиц как в несущей жидкости, так и в несущем газе при разных длинах волн (например, методы малоуглового рассеяния и турбидиметрические методы [1–5]);

2) методы, основанные на анализе изображений отобранной пробы ансамбля частиц, и подсчёте статистических характеристик на основе изображений ([6–10]).

Предложенные методы на сегодняшний день используются при анализе поведения частиц под действием различных физических полей (в том числе под действием ультразвуковых (УЗ) полей).

Эти методы обладают принципиальным преимуществом, которое заключается в том, что измерительный прибор почти не влияет на объект измерения (интенсивности излучения, позволяющие определить коэффициенты пропускания на разных длинах волн, достаточно слабые). Однако они не дают возможности провести прямые измерения, позволяющие выявить механизмы взаимодействия пары отдельных частиц. С помощью данных методов, в основном, производится построение предположений о механизмах взаимодействия пары частиц косвенным путём на основе статистических данных о концентрации и различных видах средних диаметров.

В частности, с помощью косвенных статистических методов установлена возможность коагуляции монодисперсного аэрозоля с дисперсией размеров частиц, равной нулю. Предыстория этого вопроса заключается в том, что возможность коагуляции монодисперсных частиц под действием ультразвука вплоть до 60-х годов прошлого века отвергалась с помощью ортокинетической теории [11, 12]. Однако позднее, при создании экспериментально такой аэрозоль, было обнаружено, что его концентрация под

действием ультразвука изменяется, даже если исходный фракционный состав монодисперсный [13].

В свою очередь, несмотря на то, что методы выявления зависимостей статистических характеристик аэрозоля от времени на сегодняшний день достаточно развиты даже для быстропротекающих процессов, косвенное построение предположений о физических механизмах не позволяет выявить все особенности взаимодействия пары частиц в жидкости на различных расстояниях между ними и при различных ориентациях их линии центров (включая влияние фазовых переходов, диффузии, термокапиллярных эффектов, обусловленных зависимостью поверхностного натяжения на границе раздела жидкостей от температуры, и так далее).

Отсутствие инструментария, позволяющего объективно выявить физические механизмы взаимодействия пары частиц в ультразвуковом поле, подтверждается тем фактом, что теории взаимодействия частиц, разработанные ещё до 70-х годов прошлого века, используются по сегодняшний день [14–19].

Поэтому следует рассмотреть возможность применения прямых методов измерений для исследования механизмов взаимодействия частиц на различных расстояниях между ними и при различных ориентациях линии центров.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Наиболее простой и очевидный метод прямых измерений для исследования механизмов взаимодействия частиц в УЗ поле (и других полях гидродинамической природы) – это скоростная киносъёмка с многократным увеличением, которая позволяет с помощью съёмки последовательности микроскопических изображений частиц (с частотой до 20 000 кадров в секунду [20], соответствующей частоте ультразвуковых колебаний) выявить зависимости положения каждой отдельной частицы от времени. Однако данный метод не позволяет провести комплекс исследований при различных заданных положениях пары частиц и ориентациях линии центров. Это связано с тем, что в методе не реализуется фиксация отдельных частиц в заданных положениях. Другими словами, невозможно задать начальные условия. Несмотря на то, что метод скоростной киносъёмки позволяет непосредственно наблюдать поведение даже микронных частиц вплоть до размеров, сопоставимых с длиной световой волны, исходные данные о положениях частиц могут быть произвольными (случайными) и не зависящими от намерений экспериментатора. Тем не менее, метод скоростной киносъёмки может быть использован для сбора статистики о взаимодействии частиц, находящихся в произвольных пространственных положениях, что даст информацию о возможных силах и механизмах

взаимодействия частиц, которая будет полезна для дальнейшей разработки более точного инструментария.

Рядом зарубежных авторов развивались методы класса Particle Image Velocimetry, которые позволяют выявить скорости частиц в различных точках пространства [21–25]. Они являются более совершенными по сравнению с классической скоростной киносъёмкой, применяют стробоскопический эффект, математические методы обработки изображений, однако по-прежнему обладают принципиальным недостатком – невозможность задания начальных условий эксперимента по координатам и скоростям частиц.

Для фиксации частиц в заданных пространственных положениях с целью дальнейшего исследования их взаимодействия в 1970-х годах был разработан оптический пинцет, основанный на явлениях давления света и взаимодействия дипольного момента, индуцируемого на сфере, с электрическим полем (Артур Эшкин, Bell Laboratories).

Эта тематика продолжает развиваться. В России на сегодняшний день существует крайне мало научных школ и специалистов, проводящих исследования оптического захвата микронных и субмикронных частиц (в частности, на примере белков). Широко известные научные школы расположены в Санкт-Петербурге (Научно-исследовательский комплекс «Нанобиотехнологии» в СПбГТУ) и Новосибирске, занимающиеся в том числе смежными тематиками, связанными с волоконными лазерами и так далее (Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения).

За рубежом данная тематика развивается шире [26–34]. Тематика развивается в:

- Harvard University, USA (предложены оптические пинцеты на основе микрооптики свободной формы, которые содержат оптические отражатели или преломляющие линзы, интегрированные на торцевых гранях волновода с помощью двухфотонной полимеризации. Предложенные оптические пинцеты фактически расположены на кристалле масштаба микросхемы. Эксперименты показали, что точность измерения смещения в установке с такими миниатюрными генераторами лазерных пучков, составляет  $\pm 7\%$ );

- University of Calgary (Canada), Budapest University of Technology and Economics and MTA-BME Lendület Magneto-optical Spectroscopy Research Group (Hungary), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Switzerland) (разработано программное обеспечение для калибровки оптических пинцетов с учётом несферической формы частиц);

- University of Gothenburg, Sweden (подробно и системно описана теория захвата частиц в оптической

ловушке на основе уравнений Максвелла с использованием мультипольных разложений [34]);

– University of Barcelona, Spain (предложен способ создания нескольких оптических ловушек с использованием одного лазера и акустооптического дефлектора путем разделения времени, то есть путем быстрой циклической фокусировки лазера между заданными пространственными местоположениями; с помощью предложенного способа осуществлён одновременный захват нескольких частиц единым лазерным пучком; экспериментально исследованная точность измерения силы с помощью таких оптических ловушек составила не хуже чем  $\pm 3\%$ );

– Universität Bremen, Deutschland (достигнуто субнанометровое разрешение при измерение смещения частиц в экспериментах по оптическому захвату клеток);

– The University of Queensland, Australia (предложена конструкция установки и проведены эксперименты с вращающимися оптическими пинцетами);

– Universidade Federal de Vicosa, Brazil (экспериментально доказана возможность устойчивого захвата сверхпарамагнитных частиц с использованием лазерных пучков с профилем Бесселя);

– Tsinghua University, South China University of Technology (China); University College London; Istituto per i Processi Chimico-Fisici (CNR-IPCF) (Messina, Italy) – предложены теоретические описания оптического захвата.

Анализ достижений в данной области, полученных ведущими мировыми университетами позволил выявить, что широко проводятся теоретические и экспериментальные исследования явления захвата частиц оптическими пинцетами, совершенствуются методики калибровки оптических пинцетов. Так, в работе [27] представлена теоретическая модель для описания деформируемых объектов в атомно-силовом микроскопе (AFM). Теория оказывается пригодной и для фотонно-силового микроскопа (Photonic force microscope, PFM), но с изменёнными граничными условиями. В работах [28, 29] описан эксперимент измерения силы взаимодействия двух капель эмульсии «масло в воде» с использованием оптико-акустических ловушек (фотонно-силового микроскопа). Выдвинута гипотеза о природе сил взаимодействия.

В работах [30, 31] рассмотрено явление столкновения двух объектов, захваченных в оптическую ловушку, аналогичное явлению коагуляции частиц под действием ультразвуковых колебаний.

На основании описанных выше работ предложены алгоритмы определения сил взаимодействия частиц, которые заключаются в обработке изображения, полученного от системы прецизионных объективов и микроскопа, для определения смещения частиц

относительного равновесного положения (положения с нулевой суммарной силой со стороны световых волн), расчета силы взаимодействия на основании линейного закона, аналогичного закону Гука.

В представленных работах выделены виды сил, действующих на частицу:

– сила давления света;

– измеряемая сила взаимодействия между частицами;

– сила Архимеда;

– сила, вызванная разностью статических и динамических давлений в несущей фазе.

Имеется множество других работ по экспериментальным исследованиям оптического захвата частиц (в основном, применительно к биофизике).

Математические модели захвата капель эмульсии в оптические ловушки описаны в работах [32, 33, 34]. В модели, представленной в статье [32], учтены различные силы, действующие на частицу со стороны сплошной фазы (сила вязкого обтекания, т.е. сила Стокса, сила тяжести, сила Архимеда). Наиболее полно теория захвата частиц в оптические ловушки изложена в труде Optical tweezers: principles and applications [34], включая методы расчёта напряжённости и магнитной индукции поля, в результате рассеяния на частицы, сил и моментов сил, действующих на частицы. Данная книга сопровождается объектно-ориентированным проектом на MATLAB, позволяющем моделировать на компьютере захват частиц оптическими пинцетами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, методы исследования статистических характеристик многофазных систем не дают возможности провести прямые измерения, позволяющие выявить механизмы взаимодействия пары отдельных частиц. Косвенное построение предположений о физических механизмах не позволяет выявить все особенности взаимодействия пары частиц в жидкости на различных расстояниях между ними и при различных ориентациях их линии центров.

Прямые методы измерений, включая скоростную киносъёмку, методы класса Particle Image Velocimetry и оптические пинцеты, позволяют выявить зависимости положения каждой отдельной частицы от времени и определить силы взаимодействия частиц на основании смещения частиц относительного равновесного положения. Широко проводятся теоретические и экспериментальные исследования явления захвата частиц оптическими пинцетами, совершенствуются методики калибровки оптических пинцетов и математические модели захвата частиц в оптические ловушки.

Таким образом, было определено, что прямые методы измерений позволяют существенно расширить

возможности изучения взаимодействия частиц, преодолевая ограничения статистических косвенных подходов и обеспечивая более точное описание динамики и коагуляции дисперсных систем.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жирнов, А.А. Параллельные вычисления в методе малоуглового рассеяния [Текст] / А.А. Жирнов, И.Р. Ахмадеев, О.Б. Кудряшова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 8. – С. 46–50.
2. Жирнов, А.А. Модификация турбидиметрического высокоселективного метода для измерения быстрот протекающих процессов [Текст] / А.А. Жирнов, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 3.
3. Khmelev, V.N., S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, V.P. Sevodin, E.D. Rozhnov, Y.M. Kuzovnikov, and D.S. Abramenko. "Studying of ultrasonic treatment effect in buckthorn wine clarification," *XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011*, Novosibirsk, NSTU, pp. 265–268, 2011.
4. Zhou, W., S. Wu, and X. Cai, "Advances in Nanoparticle Sizing in Suspensions: Dynamic Light Scattering and Ultrasonic Attenuation Spectroscopy," *KONA Powder and Particle Journal*, pp. 168–182, 2017.
5. Mertens, R., and W. Hereman, "On the diffraction of light by adjacent parallel ultrasonic waves. A general theory, 1983.
6. Shanthi, C., R. Porpatham, and N. Pappa, "Image Analysis for Particle Size Distribution," *International Journal of Engineering and Technology*, pp. 1340–1345, 2014.
7. Rishi, N.R., "Particle Size and Shape Analysis using Image with Customized Tools for Segmentation of Particles," *International Journal of Engineering and Technology*, pp. 247–250, 2015.
8. Mahmood, K., M.R. Hossain, T. Manzur, A. Shohag, and N. Tabassum, *Particle Size Analysis by Image Processing Technique*, 2016.
9. Zhirmov, A.A., N.N. Kudryashova, O.B. Kudryashova, N.V. Korovina, A.A. Pavlenko, and S.S. Titov, "Spores of puffball fungus *Lycoperdon pyriforme* as a reference standard of stable monodisperse aerosol for calibration of optical instruments," *PLoS ONE*, 2019.
10. Xie, W., R. Li, and X. Lu, "Pulsed ultrasound assisted dehydration of waste oil," *Ultrasonic Sonochemistry*, pp. 136–141, 2015.
11. Brandt, O., H. Freund, and E. Hiedemann, "Zur Theorie der akustischen Koagulation," *Kolloid-Z*, vol. 77, p. 193, 1936.
12. Подольский, А.А. К теории сближения аэрозольных частиц в звуковом поле при стоксовском режиме обтекания [Текст] / А.А. Подольский, В.И. Турубаров // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12. – № 2. – С. 266–269.
13. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Л.Д. Розенберг, ред. – М.: Наука, 1970. – 685 с.
14. Sheng, C., and X. Shen, "Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles," *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, pp. 1–13, 2007.
15. Hoffmann, T.L., "An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect," *Journal of Aerosol Science*, vol. 28, pp. 919–936, 1997.
16. Fan, F., Z.-L. Yuan, B. Zhao, and G. Yao, "Numerical simulation on fine particle coagulation in standing wave sound field," *Journal of Combustion Science and Technology*, vol. 14, pp. 253–258, 2008.
17. Stepkina, M., O. Kudryashova, and A. Antonnikova, "Sedimentation rates of fine aerosols in acoustic and electric field," *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, vol. 329, pp. 62–68, 2018.
18. Khmelev, V.N., R.N. Golykh, M.V. Khmelev, V.A. Shakura, A.V. Shalunov, and R.V. Barsukov, "Evaluation of Optimum Modes of Ultrasonic Pulsed Influence for Coagulation in Liquid-Dispersed Medium," *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*, pp. 225–231, 2016.
19. Khmelev, V.N., R.N. Golykh, E.V. Ilchenko, V.A. Shakura, V.A. Nesterov, and R.S. Dorovskikh, "Theoretical study of ultrasonic pulsed influence for evaluation optimum modes for coagulation in liquid-

dispersed systems," *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, Iss. 1, pp. 35–41, 2016.

20. The Photron FASTCAM SA-Z, accessed January 18, 2026, <https://photron.com/fastcam-sa-z/>.

21. Adhikari, D., D. Webster, and J. Yen, "Portable tomographic PIV measurements of swimming shelled Antarctic pteropods," *Experiments in Fluids*, vol. 57, p. 180, 2016.

22. Braud, C., and A. Liberzon, "Real-time processing methods to characterize streamwise vortices," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 14–25, 2018.

23. Adhikari, D., and E. Longmire, "Infrared tomographic PIV and 3D motion tracking system applied to aquatic predator-prey interaction," *Measurement Science and Technology*, vol. 24, p. 024011, 2013.

24. Sergachev, D., A.A. Mikhail'chenko, O. Kovalev, V.I. Kuz'min, G.N. Grachev, and P.A. Pinaev, "Laser-optic Measurements of Velocity of Particles in the Powder Stream at Coaxial Laser Cladding," *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 193–203, 2014.

25. White, D., "PSD measurement using the single particle optical sizing (SPOS) method," *Geotechnique*, vol. 53, pp. 317–326, 2003.

26. Galinskiy, I., O. Isaksson, I. Rebollo Salgado, M. Hautefeuille, B. Mehlig, and D. Hanstorp, "Measurement of particle motion in optical tweezers embedded in a Sagnac interferometer," Oct. 8, 2015.

27. Chan, D.Y.C., E. Klaseboer, and R. Manica, "Theory of non-equilibrium force measurements involving deformable drops and bubbles," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 165, pp. 70–90, 2011.

28. Chen, A., Y. Jing, F.-N. Sang, S.-W. Li, and J.-H. Xu, "Determination of the interaction mechanism of 10 mm oil-in-water emulsion droplets using optical tweezers," *Chemical Engineering Science*, vol. 181, pp. 341–347, May 18, 2018.

29. Chen, A., S.-W. Li, F.-N. Sang, H.-B. Zeng, and J.-H. Xu, "Interactions between micro-scale oil droplets in aqueous surfactant solution determined using optical tweezers," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 532, pp. 128–135, Dec. 15, 2018.

30. Chen, A., S.-W. Li, D. Jing, and J.-H. Xu, "Interactions between colliding oil drops coated with non-ionic surfactant determined using optical tweezers," *Chemical Engineering Science*, vol. 193, pp. 276–281, Jan. 16, 2019.

31. Chen, A., F. Wang, Y. Zhou, and J.-H. Xu, "In situ measurements of interactions between switchable surface-active colloid particles using optical tweezers," *Langmuir*, vol. 36, no. 17, pp. 4664–4670, Apr. 13, 2020.

32. Bui, A.A.M., A.B. Stilgoe, I.C.D. Lenton, L.J. Gibson, A.V. Kashchuk, S. Zhang, H. Rubinsztein-Dunlop, and T.A. Nieminen, "Theory and practice of simulation of optical tweezers," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 195, pp. 66–75, 2017.

33. Liu, J., and Z. Li, "Controlled mechanical motions of microparticles in optical tweezers," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 5, p. 232, May 2018.

34. Resnick, A., "Optical tweezers: principles and applications, by Philip H. Jones, Onofrio M. Maragò, and Giovanni Volpe: Scope: manual, handbook, guide. Level: advanced undergraduate, postgraduate, early career researcher, teacher," *Contemporary Physics*, vol. 58, no. 1, pp. 1, 2017.

Гольх Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: [gn@bti.secna.ru](mailto:gn@bti.secna.ru).

Барсуков Александр Романович – старший преподаватель кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru).

Ильясев Сергей Гаврилович – доктор химических наук, главный научный сотрудник ИПХЭТ СО РАН, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

Суханов Геннадий Тимофеевич – доктор химических наук, главный научный сотрудник ИПХЭТ СО РАН, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

*Пышиноград Григорий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор АлтГТУ*

*Комарова Лариса Фёдоровна – доктор технических наук, профессор АлтГТУ*

*Блазнов Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)*

*Овчаренко Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ*

# REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS FOR STUDYING THE BEHAVIOR OF MULTIPHASE SYSTEMS IN DYNAMIC PROCESSES

R.N. Golykh<sup>1</sup>, A.R. Barsukov<sup>1</sup>, S.G. Ilyasov<sup>2</sup>, G.T. Sukhanov<sup>2</sup>, G.V. Pyshnogrady<sup>3</sup>,  
L.F. Komarova<sup>3</sup>, A.N. Blaznov<sup>1</sup>, A.G. Ovcharenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk

<sup>2</sup> IPCET SB RAS, Biysk

<sup>3</sup> Polzunov Altay State Technical University, Biysk

This article explores the mechanisms of interaction between micron and submicron particles in multiphase systems undergoing rapid dynamic processes (including ultrasonic exposure). The relevance of this work stems from the limitations of existing methods, which only provide statistical characteristics of the dispersed phase and do not directly measure the forces and dynamics of interaction between individual particles. High-speed filming and Particle Image Velocimetry methods for observing particle motion at a high frame rate are considered, as well as optical tweezers, which allow particles to be fixed in predetermined positions and initial experimental conditions to be set. The results presented demonstrate the feasibility of quantitatively assessing the interaction forces between pairs of particles, taking into account the influence of phase transitions, thermocapillary effects, and ultrasonic exposure. A review of domestic and international studies confirms the effectiveness of optical tweezers for analyzing coagulation, dynamics, and deformation of dispersed systems. The developed approaches can be used in colloid physics, microfluidics, biophysics, pharmaceuticals, chemistry, and polymer technology.

Index terms: multiphase systems, dynamic processes, particle behavior, modeling.

## REFERENCES

1. Zhirnov, A.A., I.R. Akhmadeev, and O.B. Kudryashova, "Parallel computations in the small-angle scattering method," *Bulletin of Computer and Information Technologies*, no. 8, pp. 46–50, 2015.
2. Zhirnov, A.A., S.S. Titov, and O.B. Kudryashova, "Modification of the highly selective turbidimetric method for measuring rapidly occurring processes," *Information and Control Systems*, no. 3, 2016.
3. Khmelev, V.N., S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, V.P. Sevodin, E.D. Rozhnov, Y.M. Kuzovnikov, and D.S. Abramenko, "Studying of ultrasonic treatment effect in buckthorn wine clarification," *XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011*, Novosibirsk, NSTU, pp. 265–268, 2011.
4. Zhou, W., S. Wu, and X. Cai, "Advances in Nanoparticle Sizing in Suspensions: Dynamic Light Scattering and Ultrasonic Attenuation Spectroscopy," *KONA Powder and Particle Journal*, pp. 168–182, 2017.
5. Mertens, R., and W. Hereman, On the diffraction of light by adjacent parallel ultrasonic waves. A general theory, 1983.
6. Shanthi, C., R. Porpatham, and N. Pappa, "Image Analysis for Particle Size Distribution," *International Journal of Engineering and Technology*, pp. 1340–1345, 2014.
7. Rishi, N.R., "Particle Size and Shape Analysis using Image with Customized Tools for Segmentation of Particles," *International Journal of Engineering and Technology*, pp. 247–250, 2015.
8. Mahmood, K., M.R. Hossain, T. Manzur, A. Shohag, and N. Tabassum, Particle Size Analysis by Image Processing Technique, 2016.
9. Zhirnov, A.A., N.N. Kudryashova, O.B. Kudryashova, N.V. Korovina, A.A. Pavlenko, and S.S. Titov, "Spores of puffball fungus Lycoperdon pyriforme as a reference standard of stable monodisperse aerosol for calibration of optical instruments," *PLoS ONE*, 2019.
10. Xie, W., R. Li, and X. Lu, "Pulsed ultrasound assisted dehydration of waste oil," *Ultrasonic Sonochemistry*, pp. 136–141, 2015.
11. Brandt, O., H. Freund, and E. Hiedemann, "Zur Theorie der akustischen Koagulation," *Kolloid-Z*, vol. 77, p. 193, 1936.
12. Podolskiy, A.A., and V.I. Turubarov, "On the theory of aerosol particle convergence in a sound field under Stokes flow conditions," *Acoustical Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 266–269, 1966.
13. Rosenberg, L.D., ed., Physics and Technology of High-Power Ultrasound. Vol. 3. Physical Foundations of Ultrasonic Technology, Moscow: Nauka, 1970.
14. Sheng, C., and X. Shen, "Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles," *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, pp. 1–13, 2007.
15. Hoffmann, T.L., "An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect," *Journal of Aerosol Science*, vol. 28, pp. 919–936, 1997.
16. Fan, F., Z.-L. Yuan, B. Zhao, and G. Yao, "Numerical simulation on fine particle coagulation in standing wave sound field," *Journal of Combustion Science and Technology*, vol. 14, pp. 253–258, 2008.
17. Stepkina, M., O. Kudryashova, and A. Antonnikova, "Sedimentation rates of fine aerosols in acoustic and electric field," *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, vol. 329, pp. 62–68, 2018.
18. Khmelev, V.N., R.N. Golykh, M.V. Khmelev, V.A. Shakura, A.V. Shalunov, and R.V. Barsukov, "Evaluation of Optimum Modes of Ultrasonic Pulsed Influence for Coagulation in Liquid-Dispersed Medium," *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016*, pp. 225–231, 2016.
19. Khmelev, V.N., R.N. Golykh, E.V. Ilchenko, V.A. Shakura, V.A. Nesterov, and R.S. Dorovskikh, "Theoretical study of ultrasonic pulsed influence for evaluation optimum modes for coagulation in liquid-dispersed systems," *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, Iss. 1, pp. 35–41, 2016.
20. *The Photron FASTCAM SA-Z*, accessed January 18, 2026, <https://photron.com/fastcam-sa-z/>.
21. Adhikari, D., D. Webster, and J. Yen, "Portable tomographic PIV measurements of swimming shelled Antarctic pteropods," *Experiments in Fluids*, vol. 57, p. 180, 2016.

22. Braud, C., and A. Liberzon, "Real-time processing methods to characterize streamwise vortices," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 14–25, 2018.
23. Adhikari, D., and E. Longmire, "Infrared tomographic PIV and 3D motion tracking system applied to aquatic predator-prey interaction," *Measurement Science and Technology*, vol. 24, p. 024011, 2013.
24. Sergachev, D., A.A. Mikhal'chenko, O. Kovalev, V.I. Kuz'min, G.N. Grachev, and P.A. Pinaev, "Laser-optic Measurements of Velocity of Particles in the Powder Stream at Coaxial Laser Cladding," *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 193–203, 2014.
25. White, D., "PSD measurement using the single particle optical sizing (SPOS) method," *Geotechnique*, vol. 53, pp. 317–326, 2003.
26. Galinskiy, I., O. Isaksson, I. Rebolledo Salgado, M. Hautefeuille, B. Mehlig, and D. Hanstorp, "Measurement of particle motion in optical tweezers embedded in a Sagnac interferometer," Oct. 8, 2015.
27. Chan, D.Y.C., E. Klaseboer, and R. Manica, "Theory of non-equilibrium force measurements involving deformable drops and bubbles," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 165, pp. 70–90, 2011.
28. Chen, A., Y. Jing, F.-N. Sang, S.-W. Li, and J.-H. Xu, "Determination of the interaction mechanism of 10 mm oil-in-water emulsion droplets using optical tweezers," *Chemical Engineering Science*, vol. 181, pp. 341–347, May 18, 2018.
29. Chen, A., S.-W. Li, F.-N. Sang, H.-B. Zeng, and J.-H. Xu, "Interactions between micro-scale oil droplets in aqueous surfactant solution determined using optical tweezers," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 532, pp. 128–135, Dec. 15, 2018.
30. Chen, A., S.-W. Li, D. Jing, and J.-H. Xu, "Interactions between colliding oil drops coated with non-ionic surfactant determined using optical tweezers," *Chemical Engineering Science*, vol. 193, pp. 276–281, Jan. 16, 2019.
31. Chen, A., F. Wang, Y. Zhou, and J.-H. Xu, "In situ measurements of interactions between switchable surface-active colloid particles using optical tweezers," *Langmuir*, vol. 36, no. 17, pp. 4664–4670, Apr. 13, 2020.
32. Bui, A.A.M., A.B. Stilgoe, I.C.D. Lenton, L.J. Gibson, A.V. Kashchuk, S. Zhang, H. Rubinsztein-Dunlop, and T.A. Nieminen, "Theory and practice of simulation of optical tweezers," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 195, pp. 66–75, 2017.
33. Liu, J., and Z. Li, "Controlled mechanical motions of microparticles in optical tweezers," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 5, p. 232, May 2018.
34. Resnick, A., "Optical tweezers: principles and applications, by Philip H. Jones, Onofrio M. Maragò, and Giovanni Volpe: Scope: manual, handbook, guide. Level: advanced undergraduate, postgraduate, early career researcher, teacher," *Contemporary Physics*, vol. 58, no. 1, pp. 1, 2017.

Golykh Roman Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, professor at the chair of methods and means of measuring and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru).

Barsukov Aleksandr Romanovich – senior lecturer at the chair of methods and means of measuring and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru).

Ilyasov Sergey Gavrilovich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher at IPHET SB RAS, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

Sukhanov Gennady Timofeevich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher at IPHET SB RAS, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

Pyshnograd Grigory Vladimirovich – Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor of AltSTU

Komarova Larisa Fedorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor at AltSTU

Blaznov Alexey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Biysk Institute of Technology (branch) of the AltSTU Federal State Budgetary Educational Institution, e-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)

Ovcharenko Alexander Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Biysk Institute of Technology (branch) of the AltSTU Federal State Budgetary Educational Institution