# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

### INTERNATIONAL WORKSHOP

«Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems»

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций»

# VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

Томск Издательский Дом ТГУ 2019

#### DOI: 10.17223/9785946218412/162

### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АГЛОМЕРАЦИЯ-ДРОБЛЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛМАЗА

 $^{1}$ Кудряшова О.Б.,  $^{1}$ Верещагин А.Л.,  $^{1}$ Балахнина А.В.,  $^{1}$ Петров Е.А.  $^{1}$ БТИ АлмГТУ, Бийск

Множество практических применений наноалмаза предполагает технологический этап введения таких частиц в жидкую среду. При этом частицы могут плохо смачиваться жидкостью. Агрегаты частиц представляют собой иерархическую наноструктуру, содержащую микро- и нанопоры, заполненные воздухом. Чтобы агрегаты разбились, а частицы равномерно распределились по объему жидкости, необходимо использовать внешнее воздействие. Часто для этих целей применяют ультразвуковую обработку суспензий. В других приложениях необходимо, наоборот, увеличить размер агрегатов в суспензии. Ультразвуковое воздействие может как разбить агрегат до первичных частиц, так и способствовать коагуляции и росту размеров агрегата. Цель данной работы заключается в поиске критерия дробление/коагуляция и описанию динамики поведения системы агрегат-наночастица-дисперсионная среда при ультразвуковой обработке.

Качественно влияние ультразвука на частицы в суспензии можно описать следующим образом.

Во-первых, ультразвук создает кавитацию в жидкости, что способствует проникновению в поры агломерата жидкости, даже при плохой смачиваемости поверхности [1, 2]. Этот процесс занимает некоторое время, которое можно оценить из решения задачи о капиллярном проникновении. При заполнении пор жидкостью и достижению на фронте волны некоторого критического значения давления, превышающего предел прочности агломерата, он разрушается – в пределе, до первичных наночастиц.

Во-вторых, ультразвук способствует более интенсивному перемещению частиц и столкновению их, что приводит к коагуляции и укрупнению агрегатов. Характерное время встреч частиц также можно оценить с учетом параметров акустической волны, концентрации частиц и др., пользуясь результатами классической работы [3].

Критерием ведущего механизма (дробление или агломерация) может служить отношение характерных времен процессов:

$$CF = \frac{t_c}{t_w} = \frac{pR_{cp}^2}{3E_p n_0 l_{cp}^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}\right)^{-1}$$

где  $t_c$  — характерное время коагуляции частиц,  $t_w$  — характерное время смачиваемости (проникновения жидкости в поры), p — суммарное давление жидкости в поре-капилляре,  $R_{cp}$  — радиус капилляра,  $l_{cp}$  — его длина,  $n_0$  — концентрация частиц в дисперсионной среде,  $E_p$  — кинетическая энергия движения частицы в ультразвуковом поле,  $\omega$  — частота ультразвука,  $\tau$  — время стоксовой релаксации частицы.

Если CF<1, то в дисперсной системе будет происходить коагуляция частиц; в противном случае агломераты могут дробиться при дополнительном выполнении условия:

$$I \ge I_{t} = 2W_{t} \left(\frac{\sigma_{stp}}{D\omega\rho_{t}}\right)^{2},$$
(1)

где I — интенсивность излучения,  $I_t$  — интенсивность излучения, при которой агломерат разрушается,  $\sigma_{stp}$  — предел прочности агломерата, D — его характерный размер,  $\rho_l$  — плотность жидкости,  $W_l$  —  $\rho_l c$  — волновое сопротивление среды, c — скорость звука в жидкости.

В соответствии с выражением (1) находим минимальный размер частицы, до которого можно разбить агломерат при данном уровне интенсивности ультразвука:

$$D_{\min} = \frac{\sigma_{stp}}{\omega \rho_l} \sqrt{\frac{2W_l}{I}}$$

При CF>1 и  $I>I_t$  дробление частиц приводит к увеличению их счетной концентрации  $n_0$  (~ $1/D^3$ ), а также к уменьшению диаметра частиц и величины  $E_p$ . Пороговая величина

# **Секция 4.** Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

интенсивности разрушения  $I_t$  также увеличивается, поэтому в какой-то момент дальнейшее разрушение частиц будет невозможно.

Даже если ведущим механизмом эволюции дисперсной системы является дробление (CF>1), оно начнется не сразу, а спустя некоторое время, необходимое для пропитки пор агломератов жидкостью. В течение некоторого времени ультразвуковой обработки будет происходить коагуляция частиц. Динамика коагуляции в данной работе описывается с помощью модели Смолуховского с ядром уравнения, зависящим от параметров ультразвукового поля [4].

В работе проведен эксперимент по ультразвуковой обработке частиц нанодисперсного алмаза детонационного синтеза марки УДАГ (массовая доля 1 % в моторном масле). Частицы УДАГ плохо смачиваются маслом, поэтому в данной модели наблюдались оба механизма ультразвукового воздействия — в первые 10 минут агломерация, затем дробление вплоть до  $D_{min}\sim0.65$  мкм (2), далее размер частиц не изменялся (рис. 1).

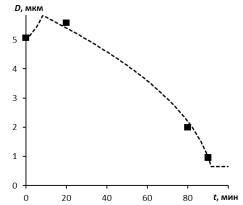


Рис. 1. Средний диаметр частиц УДАГ в суспензии в зависимости от времени ультразвуковой обработки: точки – эксперимент, кривая – расчет

Результаты эксперимента находятся в хорошем согласии с расчетными результатами. Были продемонстрированы все этапы взаимодействия ультразвука с частицами: вначале укрупнение, затем дробление вплоть до субмикронных размеров.

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение частиц в суспензии при обработке ультразвуком. Такая управляемая обработка может послужить основой для получения частиц (агрегатов частиц) необходимых размеров для конкретных технологических применений.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-19070 мк.

- 1. Kudryashova Olga, Vorozhtsov Sergey On the Mechanism of Ultrasound-Driven Deagglomeration of Nanoparticle Agglomerates in Aluminum Melt // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM). 2016. Vol. 68, No. 5. P. 1307-1311.
- 2. Kudryashova O., Vorozhtsov S., Dubkova Ya., Stepkina M. Mechanisms of acoustic processing of a metal melt containing nanoparticles // AIP Conference proceedings. 2016. Vol. 1783. P. 020123-1 020123-4.
- 3. Rozenberg L. (ed.). High-intensity ultrasonic fields. Springer Science & Business Media, 2013.
- 4. Kudryashova, O., Korovina, N., Akhmadeev, I., Muravlev, E., Titov, S., & Pavlenko, A. Deposition of Toxic Dust with External Fields //Aerosol and Air Quality Research. 2018. V. 18. P. 2575-2582.