

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертационную работу Фатталова Оскара Олеговича**  
**«Экспериментальное исследование динамики твердых и газовых включений в жидкости в вибрационном и акустическом полях»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».**

Диссертационная работа Фатталова О.О. посвящена экспериментальному исследованию динамики многофазных систем в вибрационном и акустическом полях. Интерес к данной области подогревается большими перспективами использования вибраций в медицине, нефтеперерабатывающей, горнодобывающей, фармацевтической и химической отраслях промышленности. Глубокое понимание процессов, происходящих в неоднородных по плотности гидродинамических системах под действием вибраций, является основой для эффективного решения прикладных задач, что является одной из целей диссертации. В представленной работе одновременно с фундаментальными исследованиями рассматривается конкретная задача повышения эффективности флотационного разделения смеси при помощи ультразвука. Сказанное определяет несомненную **актуальность диссертации.**

**Содержание диссертации.** Диссертация состоит из краткого введения, трех содержательных глав, заключения и списка цитируемой литературы из 193 наименований. Общий объем диссертации – 109 страниц, включая 59 рисунка.

**Во Введении** перечисляются основные результаты, выносимые автором на защиту; обсуждается актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, сформулирована цель и задачи исследования. Приводится список конференций, на которых докладывались результаты исследований, а также ссылки на список публикаций, в которых опубликованы основные результаты по теме диссертации.

**В первой главе** приведены результаты исследования динамики ансамбля тяжелых частиц в горизонтальном плоском слое прямоугольной формы под действием линейно-поляризованных вибраций. Обнаружено, что вибрационное воздействие приводит к возникновению пространственно-периодических структур из частиц. Результаты экспериментов подкрепляются численными расчетами, полученными в пределе высоких безразмерных частот. Установлено, что управляющим параметром, ответственным за возникновение структур является амплитуда скорости вибраций. Показано, что пространственный период структур полностью определяется толщиной вязкого пограничного слоя Стокса. **Впервые** в рамках трехмерного подхода численно исследовано поведение ансамбля твердых частиц в вязкой жидкости под действием линейно-поляризованных

поступательных вибраций. Обнаружено формирование равноотстоящих друг от друга плоских слоев частиц, перпендикулярных к направлению вибраций.

**Во второй главе** исследована динамика газовых пузырьков, возникающих в жидкости при ультразвуковом воздействии. В первом разделе рассматривается влияние поверхностно-активного вещества (ПАВ), а также наличия растворенных солей NaCl и KCl на поведение пузырьков в объеме жидкости. Показано, что диаметр образующихся пузырьков сильно уменьшается с ростом концентрации ПАВ, что объясняется уменьшением так называемого дзета-потенциала. Аналогичная зависимость наблюдается при повышении концентрации соли. **Впервые показано**, что ультразвуковое воздействие приводит к повышению критической концентрации коалесценции для водных растворов соли NaCl более чем в три раза по сравнению со случаем отсутствия ультразвукового воздействия. Во втором разделе исследуется поведение пузырьков вблизи помещенных в жидкость твердых пластин из кварца, акрила и тефлона. Около гидрофильной поверхности кварца образуются пузырьки, большая часть из которых всплывает. Напротив, на гидрофобной поверхности тефлона пузырьки остаются прикрепленными к ней на всех этапах эксперимента, образуя кластеры. Обсуждается скорость роста числа пузырьков в зависимости от смачиваемости поверхности.

**В третьей главе** исследуется влияние ультразвука на процесс флотации калиной руды. На основе большого числа экспериментов сделан вывод, что ультразвуковое воздействие сильно уменьшает концентрацию соли NaCl в пенном продукте, которая скапливается в камерном продукте. Эффект объясняется десорбцией ПАВ с поверхности NaCl под действием ультразвука, что приводит к её гидрофилизации. В то же время процент извлечения KCl для частиц мелкой и средней крупности остается практически неизменным. Таким образом, ультразвуковое воздействие повышает селективность разделения двух структурно близких минералов.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы диссертации.

**Теоретическая значимость** работы обусловлена обилием полученных закономерностей в многофазных системах, содержащих различные включения, в вибрационном и акустическом полях. Исследование влияния вибраций на динамику включений в жидкостях, может способствовать решению задач сепарации суспензий, эмульсий и их смесей. Обнаруженные в рамках диссертационного исследования явления обладают **новизной**. **Достоверность результатов** обеспечивается использованием надежных современных методик измерения и обработки данных, детальным изучением и анализом результатов, сравнением полученных данных с результатами других авторов. Несомненно, сильной стороной работы является **прикладной характер** третьей главы, в которой продемонстрировано возможность применения вибрационного воздействия с ультразвуковой

частотой для повышения эффективности обогащения руды методом флотации.

Основные научные результаты в достаточной степени опубликованы в 19 работах, 8 из которых в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus / Web of Science.

К работе могут быть высказаны следующие **замечания**:

1. В работе встречаются опечатки и неточности. Так, например, на стр. 23 в разделе 1.2.4 перепутан знак показателя степени толщины вязкого пограничного слоя. Справедливости ради следует отметить, что в автореферате эта опечатка отсутствует. В качестве разделительного символа между целой и дробной частью одновременно могут использоваться как “.”, так и “;” (например, подпись осей и легенда на рис. 1.9). В подписи к рис. 1.7 перепутаны между собой цвета символов и т.д.
2. Одна и та же физическая величина может одновременно выражаться в разных единицах. Например, на легенде рис. 1.9 частота измеряется в Гц, а в подписи к рисунку – в  $\text{с}^{-1}$ . То же самое замечание относится и к концентрации соли, которая измеряется то в % (рис. 2.4, стр. 54), то в М.
3. На стр. 27 в подписи к рис. 1.13 вводится число Рейнольдса, но его определение не дается.
4. Одним из выводов главы 1 является определение амплитуды скорости вибраций кюветы в качестве управляющего параметра. Тем не менее, при изменении вязкости водоглицеринового раствора (в диссертации  $\nu$  принимает значения 1 – 30сСт) должна меняться и его плотность, а, следовательно, и инерционный отклик частиц на вибрационное воздействие. Поэтому представляется, что более правильным было бы считать управляющим параметром относительную амплитуду скорости колебаний частиц.
5. Важным результатом диссертации является численное исследование ансамбля колеблющихся частиц. Непонятно, почему не проводится сравнение расчетов с результатами экспериментов.
6. Во второй главе следовало бы указать толщину светового ножа, а также выдержку, при которой были получены изображения. Это важно, поскольку от этих параметров должна сильно зависеть величина засвеченной зоны на рис. 2.7, 2.8 и т.д. Может ли достаточно большой разброс экспериментальных точек на рис. 2.7 быть связан с трехмерным движением частиц, когда пузырьки то покидают, то снова попадают в плоскость светового ножа?
7. Непонятно, почему на правом фрагменте рис. 2.6 перед коалесценцией пузырек под номером 1.2 движется вниз, т.е. против поля силы тяжести.
8. При УЗ воздействии прикрепившиеся к поверхности пластины пузырьки должны осциллировать. Возникает вопрос: отличается ли истинная площадь, покрытая пузырьками от той величины, что измеряется в экспериментах?
9. Описание рис. 2.23б в тексте диссертации отсутствует.

10. УЗ воздействие нагревает жидкость, что хорошо продемонстрировано в главе 3, например, на рис. 3.17. Некоторые эксперименты главы 2 проводились достаточно длительное время, например, на рис. 2.18 указано время 60 минут. Делались ли оценки влияния изменения температуры на динамику пузырьков?

11. Почему в главе 3 не анализировалось содержание соли NaCl в камерном продукте после УЗ воздействия?

12. На рис. 3.14 крайние точки для  $P = 45\%$  не являются элементами общей закономерности и не должны соединяться с остальными точками единой кривой.

13. Чем отличаются зеленые и красные символы на рис. 3.18?

**Заключение.** Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Работа Фатталова О.О. выполнена на хорошем научном уровне; основные результаты докладывались на конференциях всероссийского и международного уровней. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяющее требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доцент кафедры физики и технологии  
ФГБОУ ВО «Пермский государственный  
гуманитарно-педагогический университет»,  
кандидат физ.-мат. наук

---

Субботин Станислав  
Валерьевич  
15.02.2022

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,  
ПГГПУ, <http://pspu.ru>  
Телефон – 8-963-880-60-80  
E-mail: [subbotin\\_sv@pspu.ru](mailto:subbotin_sv@pspu.ru)

Подпись Субботина С.В. заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО "ПГГПУ"  
Гранкина Е.Н.

