

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
гидродинамики имени  
М.А. Лаврентьева Сибирского  
отделения Российской академии  
наук

д.ф.-м.н. Е.В. Ерманюк  
12 октября 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук  
о диссертационной работе **Карпунина Ивана Эдуардовича** «Осцилляционная динамика  
многофазных систем при действии осложняющих факторов»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Карпунина И.Э. посвящена экспериментальному изучению многофазных систем при действии инерционных силовых полей. Рассмотрено влияние вращения и вибраций на динамику легких и тяжелых фазовых включений, как с твердой, так и деформируемой границей раздела. Интересным направлением является задача об устойчивости границы раздела несмешивающихся жидкостей с высоким контрастом вязкости при нормальных к границе раздела вибрациях.

**Актуальность темы** объясняется такими важными приложениями вибрационной гидромеханики, как очистка жидкости от примеси, оптимизация перемешивания, активизация процессов сепарации и т.п.

### Оценка содержания диссертации.

Работа характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации содержит 120 страниц текста, включая 56 рисунков, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 112 источников.

**Во введении** дан обзор литературы по теме диссертации, обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная значимость. В конце введения приведены сведения об апробации работы, количестве публикаций по теме диссертации и личном вкладе автора.

**Первая глава** посвящена исследованию поведения длинного цилиндрического тела во вращающейся цилиндрической полости в поле силы тяжести при вибрациях, перпендикулярных оси вращения. Описывается скорость дифференциального вращения

тела при различных режимах колебаний. Эксперименты выполняются при различных скоростях вращения полости и при различных частотах вибраций. Если вибрации не прикладываются, то вращение тела отстает от вращения полости. Пороговым образом происходит генерация двумерных круговых колебаний тела относительно некоторого смещенного положения от оси полости при действии поступательных вибраций на данную систему. Отмечены трехмерные прецессионные колебания и опережающее дифференциальное вращение тела при увеличении частоты вибраций. Дано оценка колебаний с разной частотой с помощью Фурье-анализа.

**Во второй главе** исследовано поведение жидкого включения, которое не смешивается с окружающей жидкостью во вращающейся цилиндрической полости. При этом прикладываются вибрации большой амплитуды. При этих же условиях на вибрацию рассмотрена задача, когда жидкое включение заменено на легкое тело. Перед тем как приложить вибрации перпендикулярные осям вращения, достигается такое состояние, когда легкая фаза под действием центробежной силы располагается вблизи оси вращения. Такое состояние называется центрифугированным. Затем налагаются вибрации с частотой, близкой к частоте вращения полости. Варьируется как частота вибраций (вращения), так и амплитуда колебаний полости. Установлено, что в системе отсчета полости возникает стационарное силовое поле при совпадении частот поступательных вибраций и вращения; это эквивалентно параллельному переносу оси вращения полости на расстояние, равное половине заданной амплитуды вибраций. Сделан вывод о том, что описанный способ осцилляционного воздействия может стать эффективным инструментом вибрационного управления гетерогенными гидродинамическими системами.

**В третьей главе** изучаются те же вопросы, но с заменой легкого тела на тяжелое. Исходным является центрифугированное состояние. Исследуется динамика при разных частотах вращения полости, частотах и амплитудах либраций. Варьируется также свойства рабочей жидкости и безразмерная частота. Чтобы уменьшить влияние силы тяжести на динамику тяжелого жидкого включения параметры эксперимента подбирались специальным образом. Что касается поведения твердого тяжелого включения при модулированных воздействиях, то зафиксированы азимутальные и вращательные колебания, вызванные вязким пограничным слоем Стокса вблизи стенки полости. Тяжелое тело отрывается от стенки полости, так как его колебания генерируют осредненную подъемную силу. Описано также и течение в полости как для низких, так и высоких безразмерных частот. В исследуемом диапазоне безразмерных частот тело отрывается от внутренней стенки полости. Условия отрыва определяются, главным образом, безразмерной частотой. Если безразмерная частота уменьшается, то монотонно понижается и коэффициент подъемной силы.

**Четвертая глава** посвящена течениям двух несмешивающихся жидкостей в круговой ячейке Хеле–Шоу, когда имеется значительный контраст вязкостей. Исследуется вопрос устойчивости границы раздела жидкостей в зависимости от нормальных к этой границе колебаний при нулевом среднем расходе и для разных частот и амплитуд вибраций, а также и при вариациях начального размера осесимметричной границы. Обнаружено, что при умеренных амплитудах колебаний межфазная граница соверша-

радиальные осесимметричные колебания, если приложена гармоническая модуляция расхода прокачиваемой жидкости. Определено пороговое значение амплитуды колебаний, при достижении которого на межфазной границе возникает неустойчивость в виде периодических по азимуту «пальцев» маловязкой жидкости. Обнаруженный тип неустойчивости схож с неустойчивостью Саффмана-Тейлора и проявляется только в фазе максимального вытеснения межфазной границы

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей работы.

**Достоверность** результатов подтверждается использованием апробированных экспериментальных методик. Экспериментальный и теоретический подходы к рассмотрению проблем и сравнение с результатами других авторов гарантируют точность результатов

#### **Научная новизна и практическая значимость работы:**

Изучено осредненное поведение легкого длинного цилиндрического тела в горизонтальном вращающемся цилиндре, заполненном жидкостью, в случаях, когда колебания тела относительно полости возбуждаются внешним статическим полем или перпендикулярными осями вращения поступательными вибрациями.

Экспериментально исследовано поведение жидкого включения при вибрациях с частотой, совпадающей с частотой вращения полости. Подобная задача рассмотрена и для твердого включения. Обнаружен эффект стационарного смещения включения с оси вращения. Сделан вывод о возможности управлять фазовым включением в равномерно вращающейся полости путем вибрационного воздействия.

Исследована динамика тяжелого цилиндрического тела в цилиндрической полости с жидкостью при модулированном вращении для широкого диапазона безразмерных частот. Установлен отрыв тела от стенки полости; важную роль при этом играет значение безразмерной частоты либраций в величине коэффициента подъемной силы.

Применительно к круговой ячейке Хеле–Шоу впервые изучена динамика границы раздела двух жидкостей с высоким контрастом вязкости в условиях вибраций. Обнаружен новый тип неустойчивости и зафиксировано появление «пальцевых» структур на межфазной границе в фазе вытеснения вязкой жидкости с повышением амплитуды ее радиальных колебаний. Установлена аналогия с неустойчивостью Саффмана – Тейлора.

Разработка методов эффективного вибрационного управления гетерогенными гидродинамическими системами обусловлена большим прикладным интересом.

Выполненные экспериментальные исследования вносят важный вклад в развитие теории вибрационной гидромеханики, так как они способствуют пониманию процессов, протекающих в многофазных системах при действии осложняющих факторов.

**Диссертация прошла необходимую апробацию.** Результаты исследований были представлены на конференциях всероссийского и международного уровней. Полученные результаты опубликованы в 29 работах, включая 6 статей в журналах из списка ВАК

(индексированы в WOS/SCOPUS), 14 статей в сборниках научных статей и трудах конференций (индексированы в РИНЦ) и 9 тезисов докладов.

#### **По содержанию диссертационной работы имются замечания:**

1. В первой главе диссертации большое внимание уделено описанию прецессии длинного цилиндра в полости. В опытах использовался однородный цилиндр. Было бы интересно рассмотреть движение цилиндра той же массы, имеющего неоднородное распределение массы по длине, что позволило бы проварировать момент инерции тела относительно поперечной оси.

2. В третьей главе рассмотрен механизм отрыва тела от колеблющейся границы. Для случая соприкосновения тела с границей было бы интересно выяснить вопрос о возможности кавитации в зоне контакта тела со стенкой (например, в опытах при пониженном давлении, либо в легкокипящей жидкости) в свете работы [J. Ashmore, C. del Pino† and T. Mullin. Cavitation in a Lubrication Flow between a Moving Sphere and a Boundary // Phys. Rev. Letters. 2005. V. 94, 124501]

3. В четвертой главе диссертации не освещен вопрос о трехмерной структуре «пальцев». В этой связи было бы уместно упомянуть работы по развитию неустойчивости в ячейке Хилле-Шоу, где обсуждается теоретически и экспериментально вопрос о неодинаковости толщины «пальца» вдоль зазора в направлении от кончика пальца до места его зарождения [Rafael M. Oliveira and Eckart Meiburg. Miscible displacements in Hele-Shaw cells: three-dimensional Navier Stokes simulations // J. Fluid Mech. 2011. V. 687. P. 431\_460], [Rafael M. Oliveira and Eckart Meiburg. Saffman-Taylor Instability and the Inner Splitting Mechanism // Phys. Rev. Letters. 2017. V. 118, 124502]. Было бы интересно рассмотреть, как модифицируются подобные явления при наличии капиллярных эффектов.

4. Во введении дан хороший обзор литературы по исследуемым задачам, в т.ч. неустойчивости при распространении фронтов в ячейке Хилле-Шоу. Для полноты обзора было бы уместно упомянуть направление исследований, связанное с исследованием влияния дефектов поверхности на динамику распространения фронта капиллярного вытеснения. Примером работы в этом направлении является статья: [X. Clotet, J. Ortín and S. Santucci Disorder-Induced Capillary Bursts Control Intermittency in Slow Imbibition // Phys. Rev. Letters. 2014. V. 113, 074501]. Изучение влияния вибраций на статистику событий в подобных системах может представлять большой интерес.

#### **Заключение**

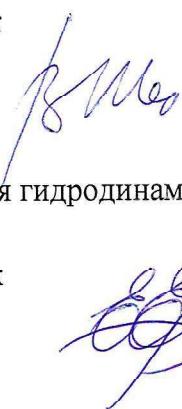
Диссертационная работа Карпунина И.Э. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования методов вибрационного управления гетерогенными гидродинамическими системами.

Диссертация «Осцилляционная динамика многофазных систем при действии осложняющих факторов» удовлетворяет требованиям п.9 "Положения о Присуждении ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертационным работам, а её автор, Карпунин И.Э., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа обсуждалась на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, протокол заседания № 22 от 28.09.2022 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании № 23 от 05.10.2022 г.

Заведующий лабораторией  
фильтрации ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук

12.10.2022



Шелухин Владимир Валентинович

Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»  
директор ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук

12.10.2022



Ерманюк Евгений Валерьевич

Сведения о ведущей организации: ИГиЛ СО РАН  
Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск,  
пр. Лаврентьева, д. 15  
Официальный сайт: <https://hydro.nsc.ru>  
Телефон: +7 (342) 239-62-27  
Адрес электронной почты: [shelukhin@hydro.nsc.ru](mailto:shelukhin@hydro.nsc.ru),  
[ermanyuk@hydro.nsc.ru](mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru)



Подписи Шелухина В.В. и Ерманюка Е.В. удостоверяю  
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН к.ф.-м.н.



12.10.2022