

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника
Рыжкова Ильи Игоревича на диссертационную работу
Карпунина Ивана Эдуардовича «Осцилляционная динамика многофазных систем при действии осложняющих факторов», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация Карпунина И.Э. посвящена экспериментальному изучению «вибрационной» динамики многофазных систем при действии осложняющих факторов (вращения, неоднородности свойств жидкости).

Актуальность диссертационной работы. Изучение задач, в которых рассматривается влияние осциллирующих сил на динамику неоднородных по плотности гидродинамических систем, безусловно, является актуальным направлением современной гидромеханики. Такие исследования представляют интерес для прикладного применения в области очистки жидкостей от примесей, интенсификации перемешивания, активизации сепарационных процессов. Диссертантом была экспериментально изучена вибрационная динамика ряда многофазных систем (легкие и тяжелые включения в жидкости в условиях суперпозиции вращения и вибраций, а также влияние колебаний расхода на вытеснение одной жидкости другой при наличии контраста вязкости).

Содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 120 страниц текста, включая 56 рисунков, а также список литературы из 112 источников.

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации, формулируются цель и задачи исследования, изложены защищаемые научные положения.

В первой главе представлены результаты систематического исследования динамики цилиндрического тела относительно большой длины во вращающейся цилиндрической полости в поле силы тяжести и при перпендикулярных оси вращения вибрациях. Внимание уделяется изучению скорости дифференциального вращения тела и режимам колебаний. Эксперименты проводятся в зависимости от скорости вращения полости, частоты вибраций. При вращении полости в отсутствие вибраций во всем диапазоне частот вращения наблюдается интенсивное отстающее вращение тела. При действии поступательных вибраций на данную систему пороговым образом происходит генерация двумерных круговых колебаний тела относительно некоторого

смещенного положения от оси полости. Увеличение частоты вибраций приводит к опережающему дифференциальному вращению тела, для которого характерны уже трехмерные прецессионные колебания. Проведенный Фурье-анализ колебаний тела позволяет определить вклад колебаний с разной частотой определяющих динамику цилиндрического тела.

Во второй главе рассмотрено влияние поступательных вибраций большой амплитуды на динамику легкого тела в жидкости или системы двух несмешивающихся жидкостей, помещенных во вращающуюся цилиндрическую полость. Эксперименты проведены в условиях, когда под действием центробежной силы легкая фаза располагается вблизи оси вращения, то есть достигнуто центрифугированное состояние системы. При этом частота вибраций близка к частоте вращения полости, а направление вибраций перпендикулярно оси вращения. В экспериментах варьируется частота вибраций (вращения) и амплитуда колебаний полости. Показано, что совпадение частот вибраций и вращения при поступательных вибрациях полости приводят к эквивалентному параллельному переносу оси вращения полости на расстояние, равное половине заданной амплитуды вибраций. Экспериментально доказано, что подобный механизм осцилляционного воздействия является эффективным инструментом вибрационного управления широкого класса гетерогенных гидродинамических систем.

В третьей главе изучается динамика тяжелого цилиндрического тела в горизонтальной заполненной жидкостью цилиндрической полости, совершающей модулированное вращение. Эксперименты проводятся при центрифугированном состоянии системы в зависимости от частоты вращения полости, частоты и амплитуды либраций, свойств рабочей жидкости и параметра именуемого безразмерной частотой. Параметры эксперимента подобраны таким образом, чтобы динамика тяжелого фазового включения не отягощалась влиянием поля силы тяжести. Показано, что при модуляции скорости вращения полости тяжелый цилиндр совершает как азимутальные, так и вращательные колебания, вызванные взаимодействием цилиндра с вязким пограничным слоем Стокса вблизи стенки полости. Подобные колебания тела приводят к генерации осредненной подъемной силы, вызывающей отрыв тяжелого тела от стенки полости. Рассмотрена структура течения в полости для низких и высоких безразмерных частот. Важным результатом является обнаруженная зависимость коэффициента подъемной силы, действующей на цилиндр и приводящей к его отрыву, от безразмерной частоты.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию устойчивости колеблющейся границы раздела двух несмешивающихся жидкостей с высоким контрастом вязкостей в осесимметричном плоском щелевом зазоре (круговой ячейке Хеле–Шоу). Экспериментально исследовано влияние нормальных к границе раздела жидкостей колебаний при нулевом среднем расходе в зависимости от частоты вибраций, амплитуды вибраций и

начального размера осесимметричной границы. При умеренных амплитудах колебаний межфазная граница совершает радиальные осесимметричные колебания, но по достижении некоторого порогового значения амплитуды колебаний была обнаружена неустойчивость в виде периодических по азимуту «пальчиков» маловязкой жидкости. Обнаруженный тип неустойчивости проявляется только в фазе максимального вытеснения межфазной границы и по типу схож с неустойчивостью Саффмана-Тейлора.

Результаты исследований обобщены и представлены на плоскости безразмерных управляющих параметров.

В заключении диссертационной работы представлены основные результаты и определены перспективы дальнейшей работы.

Достоверность представленных результатов подтверждается использованием апробированных экспериментальных методик. Подробное описание экспериментальных подходов и результатов, а также теоретический анализ полученных данных и их сравнение с работами других авторов позволяют сделать вывод об обоснованности полученных результатов. Следует отметить конструктивную сложность разработанных экспериментальных установок (в частности, системы для изучения взаимного вытеснения жидкостей в условиях периодического изменения расхода), а также тщательность проведения экспериментов и анализа данных.

Научная новизна работы. Систематически изучена осредненная динамика фазовых включений, когда колебания относительно полости возбуждаются внешним статическим полем, перпендикулярными оси вращения поступательными вибрациями или модулированным вращением. **Показана** возможность вибрационного управления легким фазовым включением в равномерно вращающейся полости. В широком диапазоне безразмерных частот **обнаружено**, что величина коэффициента подъемной силы, действующей на тяжелое тело и приводящей к отрыву от стенки полости, определяется безразмерной частотой либраций полости. Впервые изучена динамика осциллирующей границы раздела двух жидкостей с высоким контрастом вязкости в радиальной ячейке Хеле–Шоу. **Обнаружен и исследован** новый тип неустойчивости, проявляющийся в возникновении периодических по азимуту надкритических структур на межфазной границе в фазе вытеснения вязкой жидкости с повышением амплитуды ее радиальных колебаний.

Практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты дают количественное и качественное описание для ряда процессов, протекающие в многофазных системах при действии осложняющих факторов. Эти результаты могут быть востребованы при разработке технологических устройств для очистки жидкостей от примесей, интенсификации перемешивания, активизации сепарационных процессов. Разработка методов эффективного вибрационного управления гетерогенными

гидродинамическими системами обусловлена большим спектром прикладных задач. Выполненные экспериментальные исследования вносят важный вклад в развитие теории вибрационной гидромеханики.

Автореферат в достаточной мере отражает основные результаты диссертационного исследования.

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 работу могут быть высказаны следующие **замечания**:

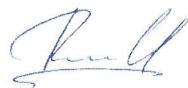
1. В пункте 1.1.2 не объяснен механизм резкого уменьшения абсолютной величины скорости дифференциального вращения тела при превышении скорости вращения полости значения 8.12 об/с. Также указано, что наблюдаемый гистерезис между прямыми и обратными ходами типичен для вращающихся двухфазных систем, однако его физические механизмы подробно не обсуждаются.
2. Представляет интерес скачкообразное изменение относительной дифференциальной скорости вращения при относительных частотах вибрации $f_{vib}/f_r = 0.41$ и 0.82 на рис. 1.7. В последнем случае соискатель связывает это с взаимодействием между внешними вибрациями и собственной частотой азимутальных колебаний (0.83 и 1.25 для отстающих и опережающих колебаний тела соответственно). Каким образом могут быть объяснены скачок при $f_{vib}/f_r = 0.41$ и его отсутствие при $f_{vib}/f_r = 1.25$?
3. При объяснении зависимости зазора между телом и стенкой полости от амплитуды модуляции скорости (рис. 3.11 и 3.12б) указано, что порог отрыва смещается в сторону более низких амплитуд с ростом частоты. Это объясняется уменьшением вязкого взаимодействия тела со стенкой вследствие уменьшения толщины вязкого пограничного слоя. Однако на рис. 3.12а наблюдается обратная зависимость – пороговое значение амплитуды, при которой происходит отрыв тела, увеличивается с ростом частоты. Данная зависимость удовлетворительно не объяснена в тексте работы.

Высказанные замечания носят уточняющий характер и не являются критическими для диссертационной работы.

Заключение. Считаю, что диссертационная работа Карпунина И.Э. является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем 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.

Ведущий научный сотрудник
отдела Вычислительной физики
ИВМ СО РАН
доктор физико-математических наук



Рыжков Илья Игоревич

10.10.2022

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Обособленное подразделение – Институт вычислительного моделирования СО РАН

Адрес: Академгородок 50 стр. 44

660036 г. Красноярск

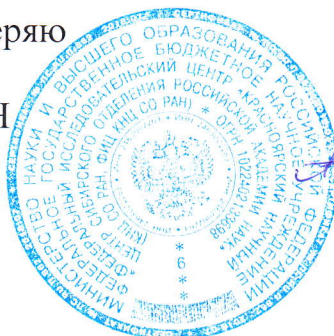
<https://icm.krasn.ru/>

Тел. +7 391 2907528, E-mail: rii@icm.krasn.ru

Я, Рыжков Илья Игоревич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Рыжкова И.И. удостоверяю

Ученый секретарь ИВМ СО РАН
к.ф.м.н.



Вяткин А.В.