

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Демина Виталия Анатольевича на диссертацию **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 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Карпунина Ивана Эдуардовича посвящена экспериментальному изучению вибрационной динамики многофазных систем при действии осложняющих факторов: вращения, переменного расхода жидкости в рабочем пространстве полости и учета различных вариантов неоднородностей свойств среды.

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется задачам вибрационной гидромеханики, в которых изучается влияние осциллирующих сил на динамику неоднородных по плотности гидродинамических систем. Эти задачи вызывают особый интерес в связи с актуальностью управления динамикой фазовых включений в жидкости при реализации флотационных процессов. Также, с фундаментальной и прикладной точек зрения большое значение имеет разработка методов позиционирования во вращающихся или вибрирующих полостях. Данный интерес напрямую связан с вопросами эффективной очистки жидкостей от примесей, интенсификации перемешивания, активизации сепарационных процессов.

Работа состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения и списка литературы. Диссертация имеет 120 страниц текста, включая 56 рисунков, а также список литературы из 112 источников.

Во **введении** выполнен обзор литературы по теме диссертации, обозначены цель и задачи исследования, ее новизна и научная значимость.

**В первой главе** представлены результаты исследования динамики длинного цилиндрического тела во вращающейся цилиндрической полости при влиянии поля силы тяжести и наличии вибраций, перпендикулярных оси вращения. Особое внимание уделяется изучению скорости дифференциального вращения тела и режимам колебаний. Эксперименты проводятся в зависимости от скорости вращения полости и 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 положения, смещенного 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 и системы двух несмешивающихся жидкостей с разными плотностями, помещенных во вращающуюся цилиндрическую полость. Эксперименты проведены в условиях, когда под действием центробежной силы легкая фаза располагается вблизи оси вращения, т.е. 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 при совпадении частот вибраций и вращения поступательные вибрации приводят к созданию стационарного силового поля в системе отсчета полости, что эквивалентно параллельному переносу оси вращения полости на расстояние, равное половине заданной амплитуды вибраций. Показано, 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 в случае центрифугированного 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. При модулированном вращении полости тяжелый цилиндр совершает как азимутальные, так и вращательные колебания, вызванные взаимодействием тела с вязким пограничным слоем Стокса вблизи стенки полости. Колебания тела индуцируют осредненную подъемную силу, приводящую к отрыву тяжелого тела от стенки полости. Рассмотрена структура течения в полости для низких и высоких безразмерных частот. В исследуемом диапазоне безразмерных частот динамика тела характеризуется его отрывом от внутренней стенки полости. Показано, что подъемная сила, а именно величина коэффициента подъемной силы, действующей на цилиндр и приводящей к его отрыву, напрямую определяется безразмерной частотой. Коэффициент подъемной силы монотонно понижается с уменьшением безразмерной частоты.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию поведения колеблющейся границы раздела двух несмешивающихся жидкостей с высоким контрастом вязкостей в осесимметричном плоском щелевом зазоре (круговой ячейке Хеле-Шоу). Изучается влияние нормальных к границе раздела жидкостей колебаний при нулевом среднем расходе. Экспериментально исследована динамика границы раздела



жидкостей в зависимости от частоты вибраций, амплитуды и начального размера осесимметричной границы. При гармонической модуляции расхода прокачиваемой жидкости обнаружено, что при умеренных амплитудах колебаний межфазная граница совершает радиальные осесимметричные колебания. Однако при достижении некоторого порогового значения амплитуды колебаний на межфазной границе возникает неустойчивость в виде периодических по азимуту пальцеобразных структур 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 полученных в диссертации результатов подтверждается использованием апробированных экспериментальных методик, которые прошли многолетнюю успешную верификацию в Лаборатории вибрационной гидромеханики Пермского государственного педагогического университета, в которой выполнялась данная работа. Экспериментальный и теоретический подходы к рассмотрению проблем и сравнение с данными других авторов гарантируют валидность полученных результатов.

Соискателем получены следующие новые результаты:

1. Изучена осредненная динамика легкого длинного цилиндрического тела в заполненном жидкостью горизонтальном вращающемся цилиндре в случаях, когда колебания тела относительно полости возбуждаются внешним статическим полем или поступательными вибрациями, перпендикулярными оси вращения.
2. Экспериментально исследована динамика двухфазной системы (пара несмешивающихся жидкостей и твердое тело в жидкости) при вибрациях с частотой, совпадающей с частотой вращения полости. Обнаружен эффект стационарного смещения включения от оси вращения. Показана возможность вибрационного управления фазовым включением в равномерно вращающейся полости.
3. В широком диапазоне безразмерных частот рассмотрена динамика тяжелого цилиндрического тела в цилиндрической полости с жидкостью при модулированном вращении. Обнаружено определяющее значение безразмерной частоты либраций на величину коэффициента подъемной силы, когда ее действие на тяжелое тело приводит к отрыву от стенки полости.
4. 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 «пальчиковых» структур на межфазной границе в фазе вытеснения вязкой жидкости с



повышением амплитуды ее радиальных колебаний. Показано, что неустойчивость по типу аналогична неустойчивости Саффмана – Тейлора.

Понимание процессов, протекающих в многофазных системах при действии осложняющих факторов, важно с позиции применимости результатов диссертационного исследования в производственных и технологических процессах. Разработка методов эффективного вибрационного управления гетерогенными гидродинамическими системами обусловлена большим прикладным интересом в геофизических приложениях. Выполненные экспериментальные исследования вносят важный вклад в разработку различных технологий, использующих методы и подходы вибрационной гидромеханики.

Диссертация прошла все необходимые этапы апробации. Результаты исследований были представлены на профильных 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 изданы в сборниках научных трудов и материалах конференций (индексированы в РИНЦ). Также опубликовано 9 тезисов докладов.

По результатам каждой из глав у рецензента возникли следующие замечания и вопросы:

**Во введении** соискатель обсуждает результаты работ по морфологической неустойчивости в пористых средах и ячейке Хеле-Шоу. Приводит ссылки на некоторые работы, вышедшие за рубежом [47-49]. В тексте диссертации повсеместно делается упор именно на исследовании устойчивости фронта вытеснения, хотя как представляется рецензенту это не совсем так. Во-первых, предметно устойчивости было посвящено достаточно много работ коллег из Екатеринбурга. Рецензент имеет ввиду работы В.Д. Селезнева и Л.М. Мартюшева. Так в 2009 году в Диссертационном совете Пермского государственного университета по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» защищалась работа А.И. Бирзиной «Морфологическая устойчивость фазовой границы при радиальном вытеснении жидкости в ячейке Хеле-Шоу», которая была выполнена под научным руководством проф. В.Д. Селезнева. Там были представлены результаты теоретического исследования устойчивости границы раздела для жидкостей с разными вязкостями в ячейке Хеле-Шоу, а также был выполнен эксперимент по стационарному вытеснению одной жидкости другой. Представляется, что в оппонируемой диссертации предметно устойчивость исследована достаточно опосредованно, в том смысле, что скорее рассмотрена общая динамика пальчиковых структур при переменном изменении расхода в гидродинамической системе. К сожалению работы А.И. Бирзиной не упомянуты вообще в диссертации соискателя.

Не очень понятно, что имел в виду соискатель **в первой главе** при написании следующих слов на стр 38:



«...наиболее часто наблюдаемым поведением исследуемой системы является прецессия. Она возникает во всех случаях, когда положение тела становится нестабильным: переход от колебаний к устойчивому радиальному смещению в гравитационном случае, переходы между различными модами движения при вибрациях и, наконец, в резонансе при поступательных круговых колебаниях тела. Предположительно причина в том, что момент инерции рассматриваемого длинного цилиндрического тела относительно его поперечной оси намного больше, чем его собственный момент инерции относительно собственной оси симметрии».

Вообще-то прецессия может наблюдаться при движении любого осесимметрического волчка с любым аспектным отношением и не обязательно при условии, что момент инерции цилиндрического тела относительно поперечной оси должен быть много больше, чем его собственный момент инерции относительно оси симметрии. Способность участвовать в прецессионном движении – это неотъемлемое свойство любого осесимметрического волчка.

**Во второй главе** на стр. 48 автор пишет, что

«серии экспериментальных точек расслаиваются по частоте вращения, это связано с вкладом поля тяжести в дифференциальное вращение тела. В интервале  $A_{\text{vib}} = 1.0 \div 1.5$  см наблюдаются резкие возрастания  $\Delta f$  по отношению к общему росту. Данное явление находится в стадии изучения. Предположительно, оно может быть связано со сменой типа движения тела». Представляется, что здесь опять отсутствует ясность изложения и приходится только догадываться, что имеет в виду автор. То ли речь идет о том, что тело перестает быть абсолютно твердым и начинают играть роль изгибные моды, то ли вступает в силу фактор неравенства второго и третьего моментов инерции тела, т.е. система начинает чувствовать слабую асимметричность волчка.

**По третьей главе** у рецензента возникло ощущение некоторой незавершенности исследования. Хотя объем проделанной работы для диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и представляется перевыполненным все же здесь так и просится проведение дополнительных экспериментов с цилиндром, центр тяжести которого смещен относительно оси симметрии тела. Исследования в этом направлении сильно бы украсили данную главу.

**По четвертой главе** рецензенту хотелось бы видеть в работе количественное согласие защищаемых экспериментальных данных по азимутальному волновому числу и другим параметрам с известными как теоретическими, так и экспериментальными работами при монотонном движении фронта вытеснения. Об этом сравнении говорится и в автореферате, и тексте диссертации, но полноценно этот предельный случай монотонного вытеснения количественно в работе никак не освещен.

**Автореферат** достаточно качественно оформлен и адекватно отражает содержание диссертации. В нем представлены все необходимые разделы, а именно, показана



актуальность диссертационного исследования, четко сформулированы цели и задачи работы, продемонстрирована новизна и указана значимость защищаемых результатов, подтверждена апробация материалов диссертации, очерчено их место в той области знаний, по которой осуществляется защита. В отношении автореферата у рецензента сложилось лишь небольшое замечание. А именно, не удалось избежать досадных опечаток. Одна из них имеет место на стр. 5, где в предложении неправильно склоняется слово «сравнение»:

«Экспериментальный и теоретический подходы к рассмотрению проблем и сравнением с результатами других авторов гарантируют точность результатов».

Несмотря на сделанные замечания можно утверждать, что по совокупности полученных результатов, научной значимости рассмотренных вопросов, широте использованных методов и подходов диссертация Карпунина Ивана Эдуардовича «Осцилляционная динамика многофазных систем при действии осложняющих факторов» является законченным научным исследованием в области вибрационной гидромеханики. В частности, она представляет несомненный интерес с точки зрения разработки технологии экспериментальных наблюдений и обработки данных при комбинировании сложных разнородных инерционных воздействий на гидродинамические системы.

В качестве заключения следует отметить, что работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе п.9 "Положения о присуждении ученых степеней", а ее автор, Карпунин Иван Эдуардович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

заведующий кафедрой теоретической физики  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета, доктор  
физико-математических наук, доцент

**Демин Виталий Анатольевич**

04 октября 2022 г.

demin@psu.ru , рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208  
адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,  
Пермский государственный национальный исследовательский  
университет, кафедра теоретической физики

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Карпунина Ивана Эдуардовича «Осцилляционная динамика многофазных систем при действии осложняющих факторов», и их дальнейшую обработку.



Подпись В.А. Демина заверяю  
Ученый секретарь совета  
Е.В. Фирюнов