

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.08

Соискатель: Юй Чжаокай

Тема диссертации: «Колебания жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации»

Специальности: 1.1.7. - «Теоретическая механика, динамика машин»

1.1.9. - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Решение диссертационного совета по результатам защиты: на заседании 29 сентября 2023 года, протокол № 10, диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», и принял решение присудить Юй Чжаокай ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Красильников П.С. – председатель, Гидаспов В.Ю. – ученый секретарь, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников В.А., Маркеев А.П., Никитченко Ю.А., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Черепанов В.В., Шамолин М.В.

Председатель диссертационного
совета 24.2.327.08, д.ф.-м.н., проф.

Красильников
Павел Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.08, д.ф.-м.н., с.н.с.

Гидаспов
Владимир Юрьевич



ОТДЕЛА УДС МАИ

Иванов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.08,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29 сентября 2023 г. № 10

О присуждении Юй Чжаокай, гражданину Китайской Народной Республики, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Колебания жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации», представленная к защите по специальностям 1.1.7. – «Теоретическая механика, динамика машин» и 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», принята к защите 24.05.2023 г., протокол № 7, диссертационным советом 24.2.327.08, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, приказ Минобрнауки РФ о создании совета - № 1192/НК от 12.10.2022.

Соискатель Юй Чжаокай, 28 сентября 1991 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный

исследовательский университет)» по специальности «Космические аппараты и ракеты-носители» с присуждением квалификации «Бакалавр» (диплом с отличием серия 107731 номер 0072850 от 16.06.2017 г.).

В 2019 г. окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 24.04.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» с присуждением квалификации «Магистр» (диплом с отличием серия 107731 номер 0266304 от 24.06.2019 г.).

В период с 2019 г. по 2023 г. проходил обучение в очной аспирантуре на кафедре «Космические аппараты и ракеты-носители» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по направлению 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника» (Справка № 04.03-00-22/43).

Диссертация выполнена на кафедре «Космические аппараты и ракеты-носители» факультата «Специальное машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – Темнов Александр Николаевич, к.ф.-м.н., доцент, работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана, на кафедре космических аппаратов и ракет-носителей в должности доцента.

Научный консультант – Шкапов Павел Михайлович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

1. Шклярчук Фёдор Николаевич, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной механики Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации.
2. Досаев Марат Закирджанович, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Научно-исследовательского института механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

Все оппоненты дали положительное заключение о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского» (ИПМех РАН) (119526. Москва, проспект Вернадского, д.101, к.1) представила положительный отзыв, который подписан ведущим научным сотрудником лаборатории механики сложных жидкостей, доктором физико-математических наук, доктором экономических наук, профессором Булатовым Виталием Васильевичем.

В отзыве ведущей организации указано, что диссертационная работа Юй Чжаокай на тему «Колебания жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации» является законченной научной работой, посвящена проблеме статического и динамического поведения жидкости со свободной поверхностью в сосуде сложной геометрической формы в условиях микрогравитации.

Основное внимание уделено изучению формы свободной поверхности жидкости в тороидальных сосудах при различных соотношениях между массовой силой и поверхностным натяжением, а также построению моделей движения линии трёхфазного контакта и численному анализу динамических характеристик колебаний жидкости. Выбранная тема является актуальной с точки зрения теории волновых движений жидкости, поскольку

рассматривается малоизученная задача о колебаниях жидкости в двусвязной полости в условиях, близких к невесомости. Кроме того, полученные новые научные результаты о поведении жидкости в условиях микрогравитации имеют не только теоретический интерес, но и практическую ценность для технических приложений, связанных с использованием тороидальных топливных баков в ракетостроении.

Содержание работы соответствует заявленным специальностям 1.1.7. – «Теоретическая механика, динамика машин» и 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы». Автореферат отражает все ключевые результаты диссертационной работы, написан доступным языком. Диссертация соответствует требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Юй Чжаокай, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.7. – «Теоретическая механика, динамика машин» и 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В целом работа написана аккуратно. Тем не менее, по работе имеются некоторые вопросы и замечания.

1. В работе имеется только одна ссылка [107] на экспериментальную работу (Symons P. Zero-gravity equilibrium configuration of liquid-vapor interface in toroidal tanks. NASA TN D-6076, 1970) с жидкостью в тороидальном сосуде, причем микрогравитация моделировалась в башне невесомости. Имеются ли более современные экспериментальные работы, проведенные на борту самолёта или орбитальной станции?
2. Полученная в главе 2 форма равновесной свободной поверхности капиллярной жидкости в тороидальном сосуде сравнивается с экспериментом [107], в котором максимальные размеры не превышали 8 см. Сохранится ли качественное совпадение при переходе к

метровым масштабам? И каково влияние размеров сосуда на равновесную форму поверхности?

3. Не совсем понятно использование в главе 4 механического аналога малых колебаний жидкости в условиях микрогравитации. Если в 60-70-гг. прошлого века использование механических аналогов при анализе колебаний жидкости в сосудах простой формы было обосновано отсутствием мощных вычислительных средств и существенно упрощало гидродинамическую задачу, то как следует из текста диссертации формулировка эквивалентно механической задачи не является простой. Как механический аналог способствует решению гидродинамической задачи?
4. Как замечание к изложению материалов диссертации необходимо констатировать наличие орфографических и грамматических ошибок, а также стилистических неточностей.

Результаты диссертации были доложены соискателем 06 апреля 2023 г. на научно-исследовательском семинаре "Прикладная механика сплошных сред" лаборатории механики сложных жидкостей ИПМех РАН и получили положительные отзывы специалистов.

Соискатель имеет 5 публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, Scopus, WoS.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Юй Чжаокай, Темнов А.Н. Исследование равновесной свободной поверхности капиллярной жидкости в тороидальном сосуде. Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. Вып. 3. С. 1–11. (перечень ВАК РФ).

Лично соискателем разработан алгоритм отыскания форм и положения равновесия жидкости в тороидальном сосуде в условиях, близких невесомости. Реализована программа в среде MATLAB на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

2. Юй Чжаокай, Темнов А.Н. Равновесие и колебания свободной поверхности жидкого топлива в коаксиально-цилиндрических сосудах

в условиях микрогравитации. Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. Вып. 8. С. 1–15. (перечень ВАК РФ).

Автором исследованы собственные колебания капиллярной жидкости в коаксиально-цилиндрическом сосуде на основе метода Ритца. Реализован разработанный алгоритм определения собственных частот и форм колебаний капиллярной жидкости в программе MATLAB.

3. Юй Чжаокай. Волновые движения жидкого топлива в тороидальных сосудах с учётом силы поверхностного натяжения. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 78. С. 151–165. (перечень ВАК РФ, Web of Science, Scopus).
4. Юй Чжаокай, Темнов А.Н. Механический аналог малых колебаний жидкости в условиях, близких к невесомости. Труды МАИ. 2022. № 126. (перечень ВАК РФ).

Соискателем получены интегральные соотношения параметров механического аналога колебаний жидкости в условиях микрогравитации с учётом сил поверхностного натяжения. Маятник моделирует воздействие массовых сил, а влияние поверхностного натяжения учитывается спиральной пружиной.

5. Темнов А.Н., Шкапов П.М., Юй Чжаокай. Механический аналог колебаний маловязкой жидкости с учётом капиллярного эффекта. Труды МАИ. 2023. № 129. (перечень ВАК РФ).

Лично автором получено граничное условие на линии трёхфазного контакта с учётом изменения угла смачивания в процессе движения. Дана оценка диссипации энергии вблизи линии трёхфазного контакта на основе метода конечных элементов.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук Шклярчука Фёдора Николаевича, заверенный ученым секретарем Института прикладной механики РАН Карнет Ю.Н. Отзыв положительный, содержит замечания:

1. Эффективность разработанного алгоритма на основе метода Рунге-Кутты зависит от выбора начальных значений предварительно

неизвестных констант в системе дифференциальных уравнений задачи статики.

2. Не указан диапазон чисел Бонда, в котором поверхностное натяжение существенно влияет на поведение жидкости.
3. В работе исследованы только осесимметричные задачи гидромеханики невесомости.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, кандидата физико-математических наук Досаева Марата Закирджановича, заверенный и.о. директора НИИ механики МГУ Георгиевским Д.В. Отзыв положительный, содержит замечания:

1. В тексте работы присутствует большое количество опечаток и стилистических ошибок.
2. В численном решении задачи о нахождении положения равновесия жидкости не приведено достаточное условие устойчивости этого положения (решается система нелинейных уравнений, которые соответствуют лишь необходимым условиям экстремума).
3. Следовало бы описать физический смысл полученной потенциальной энергии поверхностного натяжения на линии трёхфазного контакта.
4. В работе рассмотрены только малые колебания жидкости в условиях микрогравитации. На практике могут встречаться нелинейные колебания капиллярной жидкости.
5. При выводе определяющих соотношений задачи автор в некоторых местах применяет допущения, которые вводятся только в последующих пунктах.

Кроме того, есть ещё несколько менее существенных замечаний:

1. Использование некоторых переменных опережает их описание в тексте.
2. Введение обозначений безразмерных переменных следовало провести более тщательно. Например, безразмерная координата одной границы обозначается единицей, а положение другой обозначено r_1 (так же как и в размерном варианте).

3. В описании к рис. 2.8, 3.1 указана одна линия трёхфазного контакта, хотя их две разных.
4. Внутри основного текста не хватает ссылок. В тексте присутствуют теоретические выкладки без разделения на те, которые сделаны самим автором, и те, что взяты из литературы. Например, нужна ссылка на условие Дюпре-Юнга (стр. 48), и непонятно, как получена формула 2.22.
5. Рис. 2.16 на стр. 43 необходимо заменить.
6. Нет сравнения расчётов с результатами экспериментов [107] на стр. 42. Непонятно, для чего в таб. 4.1 показаны результаты работы [105]. С чем их сравнивать?
7. Разные величины обозначены одинаковыми символами. Во второй главе z_s это производная от z по s . В третьей главе z_s – это положение частицы в равновесии. H – это средняя кривизна, на рис. 3.3 это глубина. В формуле 2.20 введена переменная $u = r_s$, а на стр. 69 u – это количество элементов линии.
8. После формулы 3.6 (стр. 49) в описании переменных присутствует вектор e , в формуле присутствует производная dh/de , которая не объяснена.
9. В обозначении оси ординат на рис. 3.3-3.6 вместо ω_2 написано w_2 .

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов. Все поступившие отзывы положительны. В поступивших отзывах отмечается актуальность и научная новизна диссертационного исследования, практическая значимость полученных результатов работы.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. Отзыв подписан заведующим кафедрой теоретической механики, доктором физико-математических наук Дорошином А.В. и заверен начальником отдела сопровождения деятельности учёных советов Бояркиной У.В. Отзыв положительный, в качестве замечаний в отзыве отмечена некоторая ограниченность в представлении результатов для

эволюции вот времени параметров движения механического аналога (маятниковой модели со спиральной пружиной).

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН. Отзыв подписан старшим научным сотрудником вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, кандидатом физико-математических наук Пикулиным С.В. И заверен начальником отдела кадров Петровой Л.А. Отзыв положительный, в качестве замечаний можно отменить следующие:

- Основное внимание в работе уделено стационарным и спектральным постановкам, однако интерес также представляют эволюционные задачи и разработка методов расчёта движения жидкости при микрогравитации в зависимости от времени. На этом стоило бы сделать акцент в дальнейших исследованиях.
- Сходимость разработанных в диссертации численных алгоритмов следовало бы обосновать более детально.

Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ. Отзыв подписан заместителем начальника Научно-образовательного центра "Безопасность интеллектуальных киберфизических систем", кандидатом технических наук Евсеевым В.Л. И заверен начальником отдела по работе с научно-педагогическими работниками Хохловой Е.Ф. Отзыв положительный, имеются несколько замечаний:

- При решении задачи статики не указан диапазон константы C , которая зависит от параметров задач, например, числа Бонда, угла смачивания и объёма жидкости.
- В выражении потенциальной энергии, связанной с влиянием поверхностного натяжения на линии трёхфазного контакта, есть параметр χ , физический смысл которого не обоснован в работе.

Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Отзыв подписан доцентом кафедры дифференциальных уравнений, кандидатом физико-математических наук Капустиной Т.О. И заверен

начальником отдела кадров Соколовой Т.А. Отзыв положительный, в качестве замечаний и рекомендаций следующие:

- При построении численного алгоритма решения задачи статики капиллярной жидкости рекомендовано детально проводить асимптотический анализ при малых числах Бонда и при больших числах Бонда. Это будет полезно для дальнейшего улучшения численного алгоритма.
- Для решения задачи о малых колебаниях капиллярной жидкости имеется операторный подход, разработанный профессором Копачевским Н.Д. Рекомендовано прочитать его работы, которые будут помогать глубоко понимать группу гидродинамических задач.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». Отзыв подписан заведующим кафедрой математического анализа, доктором физико-математических наук Муратовым М.А., профессором кафедры математического анализа, доктором физико-математических наук Загора Д.А. И заверен первым проректором, проректором по академической и административной политике Курьяновым В.О. Отзыв положительный, замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в отрасли наук, к которой относится диссертационная работа Юй Чжаокай, что подтверждается наличием у них многочисленных публикаций по теме диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных лично соискателем исследований:

- Построены и апробированы физико-математическая и вычислительная модели для определения положений и форм равновесия свободной поверхности жидкости в двухсвязных сосудах в условиях микрогравитации. Дано объяснение явления сосредоточения капиллярной жидкости около

внешней стенки тороидального сосуда, экспериментально наблюдаемого в башне невесомости.

- Разработана методика исследования малых колебаний жидкости в двухсвязных сосудах с учётом поверхностного натяжения. Подробно оценено влияние граничных условий на линии трёхфазного контакта на собственные значения и формы колебаний жидкости в условиях микрогравитации.
- Проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на выявление влияния капиллярного эффекта на статическое и динамическое поведение жидкости в условиях микрогравитации. Получены зависимости динамических характеристик колебаний жидкости от параметров системы, в том числе числа Бонда, угла смачивания, объёма жидкости и геометрии сосуда.
- Исследованы вынужденные колебания жидкости в условиях микрогравитации, вызываемые движением сосуда. Получены интегральные формулы гидродинамических коэффициентов движения жидкости, определенные на основе метода конечных элементов.
- Предложена маятниковая модель со спиральной пружиной для моделирования движения жидкости в сосудах. Маятник моделирует воздействие массовых сил, а влияние поверхностного натяжения - спиральная пружина. Обоснован физический смысл жёсткости спиральной пружины, которая означает поверхностную энергию капиллярной жидкости.
- Оценена диссипация энергии вблизи линии трёхфазного контакта. Получено соотношение между изменением угла смачивания и скоростью движения линии трёхфазного контакта в процессе колебаний жидкости. На основе метода возмущений свободной поверхности жидкости получено новое граничное условие на линии трёхфазного контакта, учитывающее изменение угла смачивания. Из него вытекает классическая модель сохранения угла смачивания, описанная в работе Копачевского Н.Д., и модель неподвижной линии контакта, иногда наблюдаемой в экспериментах на практике.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

- Полученные результаты о положениях равновесия и динамических характеристиках жидкого топлива в коаксиально-цилиндрическом и тороидальном сосудах могут быть полезны для дальнейшего проектирования двухсвязных топливных баков верхней ступени ракет-носителей и разгонных блоков;
- Полученные формы равновесной свободной поверхности могут быть использованы при проектировании заборных устройств топливных баков космических аппаратов, так как для решения подобных задач необходимо учитывать положение равновесия жидкости в космическом пространстве;
- Определённые динамические характеристики колебаний жидкости в слабых гравитационных полях могут быть использованы при анализе динамики и устойчивости движения верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов.

Достоверность результатов обеспечивается:

- использованием в работе известных вариационных принципов механики и энергетического подхода, как способов решения задач гидромеханики;
- реализацией разработанного алгоритма на программном комплексе MATLAB с проверкой достоверности и сходимости на ряде тестовых задач;
- удовлетворительным согласованием результатов отдельных частей работы с известными данными других авторов, как аналитическими, численными, так и экспериментальными.

Личный вклад соискателя. Подробные формулировки приведенных задач в диссертационной работе выполнены соискателем. Алгоритмы решения задач на основе метода конечных элементов разработаны и реализованы в среде MATLAB лично автором. Все представленные результаты получены лично соискателем.

Диссертационная работа Юй Чжаокай полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой проведены автором исследования актуальных задач определения динамических характеристик жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации с учётом сил поверхностного натяжения на основе метода конечных элементов.

На заседании 29 сентября 2023 года протокол № 10 диссертационный совет принял решение присудить Юй Чжаокай ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.1.7. – «Теоретическая механика, динамика машин» и 6 докторов наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании; из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного
совета 24.2.327.08,
доктор физико-математических наук,
профессор

Красильников
Павел Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.08,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Гидаспов Владимир
Юрьевич



29 сентября 2023 г.