

## ОТЗЫВ

официального оппонента Досаева Марата Закирджановича на диссертацию Юй Чжаокая на тему «Колебания жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.7. – «Теоретическая механика, динамика машин» и 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Юй Чжаокая посвящена определению динамических характеристик жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации с учётом сил поверхностного натяжения. В исследовании равновесия и колебаний капиллярной жидкости применялись вариационный и энергетический подходы.

В условиях микрогравитации капиллярная специфика в основном проявляется в граничных условиях на свободной поверхности и вблизи линии контакта жидкости, газа и стенки сосуда. Учёт поверхностного натяжения при исследовании гидромеханической системы жидкость-газ-твёрдая стенка имеет практическую значимость в ракетно-космической технике. Этим определяется актуальность работы.

Автором работы описан механизм диссипации энергии вблизи линии трёхфазного контакта жидкости, газа и стенки сосуда и характеристики движения жидкости получены с учётом изменения угла смачивания в процессе этого движения. Следует отметить, что диссипация энергии вблизи линии трёхфазного контакта является одной из возможных причин рассогласования известных экспериментальных и теоретических значений коэффициента затухания колебаний в рассмотренной задаче. В этом состоит научная новизна диссертационной работы.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«07» 09 2023г.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 128 наименований.

Во **Введении** отмечена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, определяющие научную новизну и практическую ценность полученных результатов, указан личный вклад соискателя и описана структура работы.

В **Главе 1** приведен обзор литературы по исследованию поведения жидкости в условиях микрогравитации и введены основные понятия гидромеханики невесомости.

В **Главе 2** рассмотрена осесимметричная задача о положении равновесия капиллярной жидкости в двухсвязных полостях в нелинейной постановке.

Данная глава посвящена решению задачи равновесия гидромеханической системы жидкость–газ–твёрдая стенка сосуда и алгоритмам отыскания форм равновесной свободной поверхности жидкости в двухсвязных полостях. Дано теоретическое объяснение явления сосредоточения капиллярной жидкости около внешней стенки тороидального сосуда, экспериментально наблюдаемого в башне невесомости.

В **Главе 3** проведены исследования малых колебаний идеальной несжимаемой жидкости ограниченного объёма в условиях микрогравитации.

Получена потенциальная энергия движущейся жидкости с учётом форм свободной поверхности и стенки сосуда относительно состояния равновесия жидкости в условиях микрогравитации. С применением вариационного принципа Гамильтона-Остроградского выведены динамическое условие на свободной поверхности и граничное условие на линии трёхфазного контакта, в которых проявляется капиллярная специфика. Рассмотрены две модели

граничного условия на линии трёхфазного контакта: условие сохранения угла смачивания и заземлённая линия трёхфазного контакта.

В Главе 4 разработан теоретико-механический аналог малых движений жидкости в условиях микрогравитации и обоснованы механизмы диссипации энергии колебаний маловязкой жидкости с учётом капиллярного эффекта.

В данной работе маятник моделирует воздействие массовой силы, а влияние поверхностного натяжения учитывается спиральной пружиной. С применением уравнения Лагранжа 2-го рода составлены уравнения движения капиллярной жидкости и маятниковой модели. Параметры механического аналога определены из равенства по силе, моменту, собственным частотам жидкости и её аналога. Также исследована диссипация энергии вблизи линии трёхфазного контакта на основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского для неконсервативной механической системы.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что полученные характеристики движения жидкости в коаксиально-цилиндрическом и тороидальном сосудах могут быть использованы при проектировании двухсвязных топливных баков верхней ступени РН и разгонных блоков.

Основные результаты отражены в 15 научных публикациях, из них 4 работы в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, и 1 работа из Перечня международных научных изданий, включенных в базу данных Web of Science, Scopus.

Автореферат полно отражает содержание диссертационной работы.

По диссертационной работе можно сделать следующие 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 этого есть еще 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 трехфазного 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 расчетов 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  $\omega_2$  написано  $w_2$ .

Сделанные замечания не изменяют положительной оценки диссертационной работы Юй Чжаокай.

**Заключение.** Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и соответствует установленным требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» № 842 от 24 сентября 2013 г. Автореферат соответствует всему содержанию диссертации.

Диссертационная работа на тему «Колебания жидкости в двухсвязных полостях в условиях микрогравитации» полностью соответствует выбранным специальностям, а её автор, Юй Чжаокай, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.7. –

«Теоретическая механика, динамика машин» и 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,

Зам. директора НИИ Механики МГУ, к.ф.-м.н.



М.З. Досаев

«28» мая 2023 г.

Адрес работы: 119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д.1

Адрес электронной почты: dosayev@imes.msu.ru

Подпись Досаева М.З. заверяю

*и.о. директора НИИ  
механики МГУ*



*Тершевский Д.В.*

*с отзывом ознакомлен 07.09.2023 г.*