

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**на диссертацию Ян Наинг У «Колебания твёрдых тел, имеющих полости, наполненные вращающейся стратифицированной жидкостью»,**

**представленную на соискание ученой степени**

**кандидата физико-математических наук по специальности**

**1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин»**

В рецензируемой диссертации рассмотрена задача о свободных колебаниях вращающегося тела с полостью, полностью и частично наполненной стратифицированной жидкостью, относительно стационарного вращения. Представлены численные результаты собственных частот свободных колебаний стратифицированных жидкостей для внутренних и поверхностных волн при малых и больших угловых скоростях. Оценено влияние интенсивности расслоения жидкости на устойчивость движения твёрдого тела с жидкостью.

### **Актуальность и практическая значимость**

Актуальность темы диссертационной работы соискателя связана с проблемой, обусловленной все более широким использованием сжиженного газа и стратифицированных жидкостей в ракетно-космической технике и в промышленности. Разработанные исследования устойчивости вращения твёрдого тела со стратифицированной жидкостью могут быть использованы при проектировании космических заправочных станций, космических танкеров и морских газовозов, а также при совершенствовании различных технологических процессов в машиностроении.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка публикаций и литературы. Полный объём работы составляет 166 страниц машинописного текста, включая 62 рисунков и 14 таблиц. Список литературы состоит из 139 наименований, включая работы диссертанта по теме исследования.

## Содержание работы

Во введении представлена актуальность темы диссертации, сформулирована цель, поставлены задачи работы, изложена научная новизна, практическая ценность и достоверность полученных результатов, описаны методы исследования, а также приведены данные о структуре и объеме диссертации, апробации работы и публикации.

В главе 1 приведен литературный обзор современного состояния исследований динамики твёрдых тел с полостями, наполненными жидкостью, который условно разделен на три группы. К первой группе отнесены исследования динамики твёрдых тел с полостями, полностью и частично наполненными несжимаемой однородной идеальной или вязкой жидкостью. Вторая группа связана с исследованиями стратифицированных жидкостей, в частности, с анализом колебательного поведения стратифицированных и криогенных жидкостей в подвижных резервуарах. Третья группа касается исследований динамики стратифицированных и криогенных жидкостей в замкнутых и открытых областях.

В главе 2 исследована устойчивость сферического движения твёрдого тела с неоднородной жидкостью, совершающей однородное вихревое движение. Получены уравнения движения и выведены достаточные условия устойчивости вращения вокруг вертикальной оси динамической симметрии твёрдого тела с эллипсоидной полостью, заполненной неоднородной жидкостью.

В главе 3 рассмотрены свободные колебания вращающейся стратифицированной жидкости, полностью или частично заполняющей цилиндрический сосуд при малой угловой скорости вращения.

В главе 4 исследованы свободные колебания стратифицированной жидкости в цилиндрическом сосуде при большой скорости вращения. Получены собственные функции жидкости и собственные частоты свободных колебаний быстровращающейся жидкости, частично заполняющей цилиндрическую полость и полностью заполняющей коаксиальную цилиндрическую полость твёрдого тела.

В главе 5 исследована устойчивость стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью, полностью или частично заполненной стратифицированной жидкостью. Приведены области неустойчивости стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью,

полностью или частично наполненной однородной и стратифицированной жидкостью, в безразмерных параметрах.

Заключение содержит сводку основных результатов диссертации.

Соискателем сформулированы также следующие **основные положения, выносимые на защиту:**

1. Исследование устойчивости вращения твёрдого тела, внутри которого находится эллипсоидальная полость, заполненная идеальной неоднородной несжимаемой жидкостью с линейным распределением плотности с использованием второго метода Ляпунова.
2. Результаты расчёта собственных частот свободных колебаний вращающейся стратифицированной жидкости с постоянной частотой плавучести, полностью или частично заполняющей цилиндрическую полость в поле сил тяжести.
3. Результаты расчёта собственных частот свободных колебаний быстровращающейся жидкости, частично заполняющей цилиндрический сосуд и полностью заполняющей коаксиальный цилиндрический сосуд.
4. Построение областей неустойчивости стационарного вращения вокруг неподвижной точки твёрдого тела с цилиндрической полостью, наполненной однородной и стратифицированной жидкостью, в безразмерных параметрах.

Данные положения, а также выводы, сформулированные в диссертации, вполне обоснованны. Наиболее существенные результаты работы, указанные выше, получены лично соискателем.

### **Научная новизна**

Исследованы уравнения сферического движения твёрдого тела с эллипсоидальной полостью, заполненной неоднородной несжимаемой жидкостью, совершающей однородное вихревое движение. Получены достаточные условия устойчивости вращения вокруг вертикальной оси динамической симметрии твёрдого тела с эллипсоидной полостью, полностью заполненной неоднородной несжимаемой жидкостью. Исследованы собственные колебания стратифицированной жидкости, частично или полностью заполняющей цилиндрическую полость в твёрдом теле при малой и большой угловых скоростях вращения. Получены численные результаты собственных частот свободных колебаний вращающейся стратифицированной жидкости для внутренних и поверхностных волн.

Рассчитаны области неустойчивости стационарного вращения вокруг неподвижной точки твёрдого тела, имеющего цилиндрическую полость, полностью и частично наполненную стратифицированной жидкостью.

### **Достоверность**

Достоверность полученных результатов обеспечивается: использованием в работе известных методов исследования устойчивости движения механических систем, таких как второй метод Ляпунова и метод Четаева для построения функции Ляпунова; реализацией разработанных алгоритмов в программе Maple с проверкой достоверности и сходимости на ряде тестовых задач; удовлетворительным согласованием результатов отдельных частей работы с известными аналитическими и численными решениями, полученными в предыдущих работах, связанных с колебаниями твёрдых тел, имеющих полости, наполненные полностью или частично однородной жидкостью.

Основные результаты диссертации изложены в 15 научных работах. Из них 7 статей опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ и 8 работ – в сборниках материалов и тезисов научных конференций.

Автореферат достаточно полно и верно отражает содержание представленной диссертации за исключением списка публикаций соискателя.

### **Замечания по работе:**

1. На стр. 43-44 при составлении выражения для связки первых интегралов как суммы трех квадратичных форм отсутствует выражение для третьей квадратичной формы  $V^{(3)}$ ;
2. В математических формулах (например, (3.26) и (3.27) на стр. 65 и далее) следовало бы использовать обозначение тригонометрических и гиперболических функций, принятых в РФ: не «tan», а «tg»; не «cot», а «ctg»; не «cosh», а «ch»; не «tanh», а «th»;
3. В примере на стр. 86 присутствуют исходные данные « $H = 2$ »;  $H$  – размерная величина? Если да, то в каких единицах измерения она была взята в этом и в последующих примерах;
4. Текст диссертации содержит некоторые опечатки и несогласованность падежей в нескольких фразах.

Сделанные замечания не снижают общего уровня полученных результатов и могут рассматриваться, как предложения для дальнейшей работы. В целом, результаты диссертационной работы приставляют собой законченное исследование, посвященное решению крупной научной проблемы, имеющей важное практическое значение. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ее автор, Ян Наинг У, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

**Официальный оппонент:**

Профессор кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий»,  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»,  
доктор физико-математических наук, доцент



Русских С.В.

« 31 » ЯНВАРЯ 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Веб-сайт: <https://mai.ru/>

Электронная почта: [sergey.russkih@rambler.ru](mailto:sergey.russkih@rambler.ru)

Тел: +7 (915) 398-92-67

**Подпись профессора Русских Сергея Владимировича заверяю.**

Проректор по научной работе,  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»,  
доктор технических наук, доцент



Иванов А.В.