

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.098.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ ЯН НАИНГ У  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета  
от 20 февраля 2025 года, протокол № 1

О присуждении Ян Наинг У, гражданину  
Мьянма ученой степени кандидата физико-  
математических наук.

Диссертация «Колебания твёрдых тел, имеющих полости, наполненные вращающейся стратифицированной жидкостью» по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин принята к защите 12 декабря 2024 года, протокол № 5 диссертационным советом 24.1.098.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 225/нк от 14.02.2023)

Соискатель Ян Наинг У, 22 декабря 1990 года рождения, в 2018 году окончил магистратуру Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по направлению «Ракетные комплексы и космонавтика» и получил диплом магистра № 107731 0074709. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2024 году управлением по подготовке кадров высшей квалификации МГТУ им. Н.Э. Баумана. В период подготовки диссертации соискатель Ян Наинг У являлся аспирантом очной формы обучения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Диссертация выполнена на кафедре космических аппаратов и ракет-носителей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Научный руководитель** – кандидат физико-математических наук, доцент Темнов Александр Николаевич. Работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана, на кафедре космических аппаратов и ракет-носителей в должности доцента.

**Официальные оппоненты:**

**Русских Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт»);

**Иванов Данил Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник (Отдел №7 Динамика космических систем) (Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»)

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». В своем положительном заключении, подписанном заведующим кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, д.т.н., профессором Меркурьевым И.В., указала, что в диссертационной работе Ян Наинг У разработанная методика позволяет построить область неустойчивости стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью, заполненной стратифицированной жидкостью. Новые численно-аналитические модели вращения твёрдого тела, содержащего стратифицированную жидкость, могут быть использованы при

проектировании воздушных танкеров, морских газовозов, а также технологического оборудования в машиностроении.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 7 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 5 публикаций входят в категорию К1 и 2 публикации в К2, и 8 работ – в сборниках материалов и тезисов научных конференций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Ян Наинг У, Темнов А.Н. Механический аналог движений неоднородной жидкости // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. Вып. 7(127). С. 1–16.
2. Ян Наинг У, Темнов А.Н. Вращение вокруг неподвижной точки твёрдого тела с эллипсоидальной полостью, полностью наполненной неоднородной жидкостью // Труды МАИ. 2023. № 128. С. 1–30.
3. Ян Наинг У, Вин Ко, Темнов А.Н. Устойчивость сферического движения твёрдого тела с неоднородной жидкостью, совершающей однородное вихревое движение // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. Вып. 1(133). С. 1–18.
4. Ян Наинг У. Колебания стратифицированной вращающейся жидкости в цилиндрической полости // Труды МАИ. 2023. № 130. С. 1–28.
5. Ян Наинг У, Темнов А.Н. Колебания стратифицированной вращающейся жидкости в поле центробежных сил инерции // Труды МАИ. 2023. № 132. С. 1–37.
6. Ян Наинг У, Темнов А.Н. Об устойчивости стационарного вращения твёрдого тела с полостью, содержащей криогенную жидкость // Труды МАИ. 2023. № 133. С. 1–30.

7. Ян Наинг У, Темнов А.Н., Шкапов П.М. Свободные колебания криогенной вращающейся жидкости в цилиндрической полости // Труды МАИ. 2024. № 135. С. 1–33.

Все работы выполнены автором при редакторской поддержке научного руководителя Темнова А.Н. В этих работах автором совместно с научным руководителем были сформулированы постановка задачи и подробные уравнения задач. Все необходимые расчёты были проведены автором самостоятельно, а полученные результаты обсуждались совместно с научным руководителем Темновым А.Н. и заведующим кафедрой Шкаповым П.М. В работах [1-3] автором совместно с Темновым А.Н. установлены интегральные соотношения, которые позволяют преобразовывать уравнения однородного вихревого движения тяжелой неоднородной жидкости в переменных Эйлера. Также были выведены достаточные условия устойчивости вращения твёрдого тела с жидкостью вокруг вертикальной оси динамической симметрии. В работах [4-5, 7] автором проведены расчёты собственных частот вращающейся стратифицированной жидкости в цилиндрическом сосуде. В работе [6] автором были построены области неустойчивости стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью, наполненной стратифицированной жидкостью. Численные расчёты собственных частот колебаний жидкости и графики областей неустойчивости вращения вокруг неподвижной точки твёрдого тела с жидкостью проводились лично автором с использованием программы Maple. Основные результаты работы были представлены на конференциях и семинарах лично соискателем.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- д.т.н., профессора, заведующего кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Меркурьева И.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1.

Автор пишет, что в данной работе термины «стратифицированная», «неоднородная», и «криогенная», жидкость будут использоваться как синонимы. Это утверждение не вполне корректно. Стратифицированной, стандартно, называется жидкость, у которой изменение физических свойств в стационарном состоянии происходит лишь в конкретном направлении. При этом свойства могут изменяться непрерывно либо скачкообразно. Криогенной жидкостью называют вещество, которое может сохранять свое состояние при очень низкой температуре - около минус 273°С. Просто, в диссертации при исследовании динамики вращающейся жидкости и в том, и в другом случае рассматриваются схожие проблемы разделения задачи описания движения тела-оболочки на гидродинамическую и динамическую части.

2. Автор пишет, что при решении задач, представленных в диссертации, применялись различные математические и вычислительные методы: метод Пуанкаре, метод разделения переменных (метод Фурье), метод обобщенных потенциалов Ф.Л. Черноушко и метод Бубнова-Галёркина. Но, основной задачей описания движения тела-оболочки все-таки является начальная задача - задача Коши. Поэтому, лучше было бы упомянуть об использовании различных асимптотических методов, связанных со значениями параметров Рейнольдса, Фруда, Струхала, величинами локальных и конвективных производных. Кроме того, использование названия метода, примененного академиком Ф.Л. Черноушко в задаче о движении твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость, не общепринято.

3. Как замечание к изложению материалов диссертации, необходимо констатировать наличие орфографических и грамматических ошибок, а также стилистических неточностей.

- Д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт») Русских С.В.,

который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 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 « $N = 2$ »;  $N$  - 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.

- к.ф.-м.н., доцента, старшего научного сотрудника Отдела №7 Динамика космических систем Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» Иванова Д.С., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. При исследовании устойчивости движения твёрдого тела с неоднородной жидкостью во второй главе была построена функция Ляпунова в виде связки первых интегралов в уравнении (2.36), однако, в работе не было показано, что производная по времени построенной функции Ляпунова для консервативной системы равна нулю в силу уравнений движения, что также является достаточным условием согласно теореме Ляпунова об устойчивости. 2. Для поиска собственных частот колебаний неоднородной жидкости в цилиндрическом сосуде диссертант считает заданными законы изменения плотности жидкости в виде линейной функции от координаты вдоль вектора ускорения силы тяжести в случае медленного вращения в третьей главе и в виде логарифмической функции от относительного расстояния от оси вращения в случае быстрого вращения. В работе отсутствует обоснование выбора этих

функций изменения плотности жидкости. 3. В диссертации имеются отдельные опечатки и неточные формулировки, не влияющие на содержание работы.

- д.ф.-м.н., профессора, профессора Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Кузнецова Г.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В разделе «Основные выводы и заключения» есть пункты, которые не являются выводами, а представляют собой скорее результаты, например, «Получены достаточные условия...». 2. Третий пункт раздела «Основные выводы и заключения»: «Выполнены численные результаты собственных частот свободных колебаний...» почти невозможно правильно интерпретировать.
- к.ф.-м.н., старшего инженера-математика группы математического моделирования отдела «Управление ТЛС» Панкратова В.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: В автореферате имеется ряд обозначений, физический смысл которых не ясен.
- к.т.н., доцента, заместителя начальника НИЯУ МИФИ Евсеева В.Л. Отзыв положительный, без замечаний. Отмечено, что в данной диссертации исследуется устойчивость стационарного вращения твёрдого тела с полостью, содержащей стратифицированную жидкость, а также рассматриваются свободные колебания вращающейся стратифицированной жидкости в цилиндрическом сосуде.
- д.ф.-м.н., профессора, ведущего научного сотрудника ФГБУН ИПМех РАН Булатова В.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: При исследовании колебаний вращающейся жидкости отсутствуют результаты при умеренном вращении, когда свободная поверхность образует параболоид вращения.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:**

1. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Учет нелинейности колебаний резонаторов при идентификации параметров волновых твердотельных гироскопов разных типов // Изв. РАН. МТТ. 2022. № 6. С. 28-40.

2. Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Влияние нелинейных свойств электростатических датчиков управления на динамику цилиндрического резонатора волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. МТТ. 2021. № 6. С. 88-110.

3. Астахов С.В., Ниналалов И.Г., Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р., Салимов М.С. Уравнения малых свободных колебаний резонатора в виде тонкой оболочки вращения с учетом нелинейной жесткости // Транспортное, горное и строительное машиностроение; наука и производство. 2023. № 22. с. 9-19.

4. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Компенсация уходов волнового твердотельного гироскопа, вызванных анизотропией упругих свойств монокристаллического резонатора // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 25-36.

5. Маслов А.А., Маслов Д.А., Ниналалов И.Г., Меркурьев И.В. Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. № 1 (120). С. 3-25.

6. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Нелинейные эффекты в динамике волнового твердотельного гироскопа с плоскими электродами // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. № 4 (123). С. 64-77.

7. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Разработка методов идентификации параметров нелинейной математической модели волнового твердотельного гироскопа // XXVII Санкт-Петербургская

международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. IEEE, 2020. С. 244-248.

8. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И. В. Влияние опорного напряжения на дрейф волнового твердотельного гироскопа с плоскими электродами//Юбилейная XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам.2023. С.278-282.

9.Меркурьев И.В., Сайпулаев М.Р. Динамика и точность микромеханического гироскопа с учетом смещения инерционной массы // Вестник БГУ. Математика, информатика. 2020. Вып. 3. С. 49-62.

10. Меркурьев И.В., Салимов М.С. Трехмерная интегральная модель сухого трения для движения прямоугольного корпуса // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2021. Т. 21. № 1. С. 14-21.

11. Monakhova, Y. Mashtakov, D. Ivanov, M.Ovchinnikov. Matrix gains selection for three-axis magnetic attitude control of dynamically elongated satellite // Acta Astronautica – 2024. – V. 224, P. 445-448.

12. Kozin, M. Akhloumadi, D. Ivanov.Laboratory Study of Microsatellite Control Algorithms Performance for Active Space Debris Removal Using UAV Mock-Ups on a Planar Air-Bearing Test Bed // Drones – 2023. – V.7. I.1. №7. 27 P.

13. A. Bolotskikh, R. Zharkikh, D. Ivanov, S. Lebedev, S. Tkachev. Nanosatellite Attitude Motion Determination Algorithms Study Using Laboratory Facility // Journal of Computer and Systems Sciences International – 2022. – V.61 (4). P. 626-642.

14. D. Ivanov, D. Roldugin, S. Tkachev, M. Ovchinnikov, R. Zharkikh A. Kudryavtsev, M. Bychek. Attitude motion and sensor bias estimation onboard the SiriusSat-1 nanosatellite using magnetometer only // Acta Astronautica – 2021. – V.188. P. 295-307.

15. Tkachev, S., Mashtakov, Y., Ivanov, D., Roldugin, D., Ovchinnikov, M. Effect of reaction wheel imbalances on attitude and stabilization accuracy // *Aerospace – 2021.* – V. 8, I.9. – 252.
16. Ivanov, D., Roldugin, D., Tkachev, S., Mashtakov Y., Shestakov, S., Ovchinnikov M., Fedorov, I., Yudanov, N., Sergeev, A. Transient attitude motion of TNS-0#2 nanosatellite during atmosphere re-entry // *Applied Sciences– 2021.* – V. 11, I.15. – 6784.
17. Ivanov, D.S., Ivanova, T.A., Ivlev, N.A., Ovchinnikov, M.Y., Roldugin, D.S. Estimation of an Inertia Tensor and Automatic Balancing of a Microsatellite Mockup on an Air-Bearing Testbed // *Journal of Computer and Systems Sciences International–2021.* –№ 2, pp. 315-332.
18. Akhloumadi M., Ivanov D. Influence of satellite motion control system parameters on performance of space debris capturing // *Aerospace.* – 2020. Vol. 7, №11, paper ID 160. – 16 p.
19. M. Ovchinnikov, D. Ivanov, O. Pansyrnyi, A. Sergeev, I. Fedorov, A. Selivanov, O. Khromov, N. Yudanov. Technological NanoSatellite TNS-0 #2 connected via global communication system // *Acta Astronautica – 2020.* – V.170. P. 1-5.
20. A.D. Guerman, D. Ivanov, D. Roldugin, S. Tkachev, A. Okhitina Orbital and Angular Dynamics Analysis of the Small Satellite SAR Mission INFANTE // *Cosmic Research – 2020.* – V.58. P. 206-217.
21. Гришанина Т.В. Численно-аналитический подход к определению собственных частот колебаний замкнутой симметричной конструкции с произвольным числом однотипных стержневых элементов/ Т.В. Гришанина, М.А. Комягин, С.В. Русских // *Космонавтика и ракетостроение.* - 2024. -№ 2(135). - С. 63-76. -EDN KWAKGR.
22. Русских С.В. Нелинейная динамика трансформируемых и управляемых упругих космических систем / С.В. Русских, Ф.Н. Шклярчук. - Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. - 160 с. - ISBN 978-5-4316-0990-9. -EDN FEKUFU.

23. Гришанина Т.В. Применение метода сил для расчета пространственного движения манипулятора с массивным твердым телом с учетом упругости звеньев и поворотных приводов / Т.В. Гришанина, С.В. Русских, Ф.Н. Шклярчук // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.-2023.- № 11(764).-С. 92-103. -DOI 10.18698/0536-1044-2023-11-92-103. – EDN MBZNIU.
24. Русских С.В. Динамика плоского движения космического крана-манипулятора типа руки с учетом изгиба звеньев / С.В. Русских, Ф.Н. Шклярчук // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. -2023. - № 5(758). -С. 112-122. - DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-112-122. -EDN EYJAQK.
25. Гонц Д. А. Редуцирование уравнений гармонических колебаний крыла в несжимаемом потоке при расчетах по нестационарной и квазистационарной теориям / Д.А. Гонц, Т.В. Гришанина, С.В. Русских // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2023. - Т. 29, № 4. - С. 439-450. - DOI 10.33113/mkmm.ras.2023.29.04.01. - EDN ICIJ(I"Y.
26. Меньшиков А.А. Поворот космического аппарата по крену с устранением нелинейных колебаний солнечных батарей в момент остановки /А.А. Меньшиков, А.Ю. Нагорнов, С.В. Русских // Космонавтика и ракетостроение. - 2023. - № 3(132). -С. 65-78. -EDN BWYDTV.
27. Русских С.В. Нелинейная динамика плоской упругой стержневой системы в редуцированной квазистатической постановке по изгибу / С.В. Русских // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2022. - Т. 28, № 2. - С. 274-287. - EDN ICIWED.
28. Русских С.В. Применение одношагового метода Галеркина для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями / С.В. Русских, Ф.Н. Шклярчук // Математическое моделирование и численные методы. - 2022. - № 3(35). -С. 18-32. - DOI 10.18698/2309-3684-2022-3-1832. - EDN EQOXJW.

29. Русских С.В. Расчет формообразования космической зонтичной антенны при сильном изгибе радиальных стержней, связанных по параллелям растяжимыми тросами/ С.В. Русских, Ф.Н. Шклярчук // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. - 2021. -№ 5. - С. 99-112. - DOI 10.31857/S0572329921050093. - EDN OBNOSM.

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

**разработана** математическая модель для изучения сферического движения твёрдого тела с эллипсоидной полостью, заполненной неоднородной идеальной жидкостью, совершающей однородное вихревое движение;

**выведены** достаточные условия устойчивости вращения твёрдого тела с неоднородной жидкостью вокруг вертикальной оси динамической симметрии;

**разработан** вычислительный алгоритм, позволяющий определять численные результаты собственных частот колебаний вращающейся стратифицированной жидкости в цилиндрическом сосуде при малой и большой угловых скоростях вращения;

**разработано** математическое моделирование для построения области неустойчивости стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью, полностью и частично наполненной стратифицированной жидкостью.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**показано** совпадение уравнения сферического движения твёрдого тела со стратифицированной жидкостью с уравнением движения твёрдого тела с однородной жидкостью при отсутствии стратификации;

**проведено** исследование вращающегося движения жидкости и обнаружены дополнительные волновые движения, такие как бегущие прямые и обратные волны в стратифицированной жидкости, как внутри самой жидкости, так и на свободной поверхности, в рамках линейной теории малых колебаний.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработанный** метод построения областей неустойчивости стационарного вращения твёрдого тела с цилиндрической полостью, наполненной стратифицированной жидкостью может быть использован при анализе динамики и устойчивости движения летательных аппаратов, гироскопических устройств и космических объектов, такие как, космические заправочные станции и космические танкеры.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:**

**возможно** исследование устойчивости сферического движения твердого тела со стратифицированной жидкостью с использованием известных методов исследования устойчивости движения механических систем, таких как второй метод Ляпунова и метод первого приближения;

**результаты вычисления собственных частот колебаний жидкости** получены известными аналитическими методами и численными решениями в среде Maple в сравнении с результатами, полученными в предыдущих работах, связанных с колебаниями твёрдых тел, имеющих полости, наполненные полностью или частично однородной жидкостью.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

непосредственном участии на всех этапах исследования, включая постановку задач и получение их решений совместно с научным руководителем; самостоятельном проведении численных расчётов собственных частот колебаний жидкости и построения графиков областей неустойчивости вращения вокруг неподвижной точки твёрдого тела с жидкостью; вклад автора в основанные публикации по результатам исследования составляет приблизительно 70-80%.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: о некорректном использовании терминов «стратифицирование», «неоднородная» и «криогенная» жидкости; о применении различных

математических и вычислительных методах; об использовании обозначений тригонометрических и гиперболических функций; отсутствие обоснования выбора функций изменения плотности жидкости.

Соискатель Ян Наинг У ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания критические замечания.

На заседании 20.02.2025 Диссертационный совет принял решение: за существенный вклад в развитие аналитических и численных подходов к решению задач вращающихся твердых тел, имеющих полости с несжимаемой жидкостью и получение новых достоверных результатов по колебаниям твердого тела с жидкостью, имеющих существенное значение для развития теоретической механики присудить Ян Наинг У учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета

24.1.098.01 при ИГМех РАН,

академик РАН



Климов Д.М.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.098.01 при ИГМех РАН,

к.ф.-м.н.



Сысоева Е.Я.



21 февраля 2025 г.