

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
д.техн.н., профессор

Югов В.О.

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на автореферат и диссертацию **Хаита Анатолия Вильича** по теме **“Разработка и реализация методологических основ расчета сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска”**, представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 – «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы» в объединенный диссертационный совет 99.2.109.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

Актуальность исследования

К одним из наиболее сложных гидропневматических устройств можно отнести вихревые трубы Ранка-Хилша, рабочие процессы которых до конца не раскрыты, и поршневые генераторы волн, работа которых неразрывно связана с сугубо нелинейными физическими процессами, которые также не до конца понятны. Растущие потребности в производстве дешевой тепловой энергии, в том числе холода, требуют разработки новых удобных в эксплуатации систем, в том числе с применением вихревых устройств. Одновременно, поршневые генераторы волн играют важную роль в лабораторных испытаниях морских инженерных

26-873
27.02.2026

объектов, в том числе предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях крайнего Севера и Арктики.

Исследование и совершенствование рабочих характеристик указанных гидравлических и пневматических аппаратов существенно затруднено вследствие отсутствия точных методов расчета сложных турбулентных течений. Пробелы в научных знаниях не позволяют детально разобраться в причинах низкой энергоэффективности вихревых устройств и низкой точности работы генераторов волн. Из этого следует, что дальнейшее совершенствование обозначенных гидравлических и пневматических аппаратов бесспорно требует развития методологии математического моделирования сложных турбулентных течений жидкости и газа, что и является основной целью работы Хаита А.В. Актуальность и высокая важность таких исследований для развития экономики России не вызывает сомнения.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы» (технические науки) по следующим пунктам:

- п. 1. Математическое моделирование и оптимизация гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе;
- п. 2. Методы расчетов гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе, а также комплектующего эти системы оборудования;
- п. 3. Методы и методики экспериментального исследования гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе;
- п. 4. Исследование физических взаимосвязей между рабочими процессами, конструкторско-технологическими факторами и техническими характеристиками гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе, а также оборудования этих систем;
- п. 5. Разработка и исследование систем, методов и алгоритмов диагностики, управления и регулирования гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе, а также оборудования этих систем.

Научная новизна

Центральное место среди научных положений работы Хаита А.В. занимают модификации полуэмпирических уравнений, задающих динамику трехмерного движения жидкости и газа в гидравлических и пневматических аппаратах. Предложенные модификации корректно отразили физические процессы, ранее не учтенные в моделях течений, что дало рост точности описания процессов работы и технических характеристик гидро- и пневмосистем. Применение модифицированных уравнений для моделирования работы гидро- и пневмосистем выявило ранее неизвестные физические закономерности и явления, имеющее важное значение на практике. Совокупность теоретических и экспериментальных результатов исследований соискателя позволила разработать ряд новых конструктивных и программных решений (алгоритмов управления), которые можно охарактеризовать как значительный вклад в развитие гидропневматических устройств, использующих вихревые и волновые течения жидкости и газа.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность основных положений и результатов работы определяется верным применением фундаментальных законов и уравнений гидро- и газодинамики, а также соответствующих апробированных численных методов решения уравнений. Достоверность экспериментальных исследований обеспечивается применением поверенного метрологического оборудования, автоматизированных систем управления экспериментом, корректной обработкой измеренных данных. Достоверность исследований также обеспечивается использованием литературных данных из достаточно большого количества источников, в которых находятся подтверждения научным положениям.

Теоретическая значимость исследования заключается в формулировании гидро- и газодинамических уравнений математических моделей, обеспечивающих высокую точность описания работы отдельных гидравлических и пневматических машин и аппаратов. Это достигается за счет корректного учёта известных и впервые обнаруженных гидро- и газодинамических процессов. Обнаружение новых физических явлений в течениях жидкости и газа стало основанием для исследования их влияния на рабочие характеристики вихревой трубы и генератора волн. Предложенные методы учёта, обнаруженных физических явлений, дали возможность улучшения рабочих характеристик аппаратов за счет использования имеющихся энергетических резервов, изменения формы и размеров проточных частей, а также применения разработанных методов автоматизированного управления.

Практическая значимость работы выразилась в применении теоретических разработок на практике. На основании сформулированных уравнений математических моделей и соответствующих им численных методов создана усовершенствованная методологическая база для расчета рабочих характеристик вихревых труб и генераторов волн на воде. Применение методологии моделирования течений жидкости и газа в совокупности с экспериментальными исследованиями позволили получить ряд новых элементов проточных частей аппаратов. Оформлены соответствующие патенты на изобретение и полезную модель, зарегистрированы новые программы для ЭВМ. Указанные положения подтверждаются актами о внедрении, проложенными к диссертационной работе. Материал диссертации использовался соискателем при подготовке лекционного материала по предметам “Гидравлика”, “Механика жидкости”, “Специальные разделы механики жидкости”, “Аэродинамика вентиляции”, “Теплообмен” в рамках обучения студентов технических специальностей в двух университетах: ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, и Ариэльский университет (Израиль).

Личный вклад автора и подтверждение опубликования основных результатов исследования

Результаты исследований получены лично соискателем или в его непосредственном соавторстве. Это подтверждается достаточным количеством публикаций соискателя в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах, апробированием научных положений на всероссийских и международных конференциях и семинарах, участием в других научных мероприятиях. Публикации соискателя отражают все аспекты, представленные в автореферате и диссертационной работе.

Общая характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация характеризуется полнотой и завершенностью. Текст состоит из введения, восьми глав, заключения, списка используемых обозначений, списка литературы и восьми приложений. Материал изложен на 459 страницах, в том числе 375 страницах основного текста. Диссертация включает 150 рисунков, 25 таблиц, 427 наименований библиографического списка.

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, которая включает в себя обсуждение актуальности и степени разработанности проблемы, формулировку цели, задач, объекта и предмета исследований. Представлены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность исследования. Описаны методы исследования, обоснована достоверность

полученных результатов. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов работы и основных научных публикациях соискателя.

Первая глава содержит обзор текущего состояния проблемы математического моделирования сложных турбулентных течений в гидравлических и пневматических машинах и аппаратах. Проведен литературный анализ и приведены основные сведения об уравнениях динамики жидкости и газа с учетом различных допущений. Собраны сведения о слабой и гидродинамической турбулентности. Обсуждены существующие методы параметризации анизотропной и изотропной турбулентности, в том числе метод осреднения Рейнольдса, гипотеза Буссинеска, модель пути смешения Прандтля, параметризация турбулентного пограничного слоя, полуэмпирические модели турбулентности и др. Сформулированы научные проблемы, на решение которых нацелена представленная диссертация.

Во второй главе диссертации приведен литературный анализ исследований рабочих процессов и характеристик труб Ранка-Хилша. Акцент сделан как на теоретических, так и на экспериментальных работах. Отмечается, что несмотря на значительные усилия, энергоэффективность современных труб Ранка-Хилша остается низкой. Это связывается недостаточным пониманием физических причин возникновения эффекта температурного разделения в вихревых трубах. Делается заключение о том, что известный из литературы эффект микрохолодильных циклов не учитывается в полной мере при моделировании течения газа в вихревых трубах в рамках гипотезы Буссинеска. Для исправления данной ситуации, предложена модификация уравнений турбулентного движения газа в вихревой трубе.

В третьей главе диссертации обсуждаются научные публикации по исследованию нелинейных волн на поверхности воды, роль волн в формировании климата, вопросы морского и прибрежного строительства. Лабораторные испытания инженерных сооружений на предмет силового воздействия морских волн осуществляются в специализированных лотках, в которых применяются поршневые генераторы волн. Точность формирования волны при помощи поршневых генераторов является недостаточной. Показано, что течения жидкости, сформированные генераторами волн, описываются абсолютно теми же фундаментальными уравнениями сохранения импульса, энергии и массы. А для учета турбулентности, возникающей при обрушении волн, требуется использование гипотезы Буссинеска.

В четвертой главе исследуются процессы течения газа в вихревой трубе с применением стандартных моделей турбулентных течений, используя

коммерческий пакет ANSYS. Установлена погрешность стандартных моделей при описании температурной стратификации в вихревых трубах на уровне 30% и более. Калибровка модифицированной модели течения газа с применением пакета OpenFOAM показала сокращение ошибки до 10%.

В пятой главе приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований по повышению энергоэффективности вихревых труб. Использовался метод минимизации генерации энтропии, методы параметрического исследования, планирования эксперимента и др. Разработаны новые элементы вихревой трубы, такие как новый тип соплового ввода, развихритель холодного потока, диффузор горячего потока. Приведены сведения о промышленном внедрении результатов исследования, указывающие на заметное повышение изоэнтропного КПД вихревой трубы в режиме наибольшей холодопроизводительности.

В шестой главе исследуется течение газа в проточной части генератора волн. Приведены результаты калибровки модели турбулентности для обрушивающихся волн. Выполнено численное и экспериментальное исследования кинематических и энергетических параметров волн, полученных поршневым генератором. Установлена высокая точность модели течения жидкости при работе волнопродуктора, которую можно охарактеризовать низкой погрешностью определения пространственной координаты обрушения волны (0,55% от длины гидроволнового лотка).

Седьмая глава посвящена разработке теоретических основ алгоритмов автоматизированного управления генераторами волн. В основу теоретических разработок положены уравнения Захарова и Шредингера, позволяющие учесть нелинейные вклады, которые ранее исключались из рассмотрения.

В восьмой главе продемонстрировано, что учет дополнительных нелинейных вкладов используя разработанные алгоритмы не решает проблему низкой точности формирования поверхностной волны генератором волн. Установлено, что проблема вызвана вихревыми течениями вблизи генератора волн, которые проявили себя в разработанной модели турбулентного течения жидкости. Исходя из того, что учет турбулентности невозможен в строго аналитических методах, была введена эмпирическая функция, задача которой состоит в корректировке разработанных в седьмой главе алгоритмов управления генератором волн. Экспериментальные исследования показали существенное сокращение ошибки в форме волны, полученной с использованием представленных разработок.

Заключение диссертации включает семь пунктов, касающихся основных научных результатов и характеризующих решение поставленных задач.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

При изучении автореферата и диссертационной работы возникли следующие замечания и вопросы:

1. В холодильной технике наибольшее распространение получили парокompрессионные машины, а также детандеры объемного или динамического действия. Энергоэффективность подобных машин значительно превышает соответствующие показатели вихревых труб Ранка-Хилша, исследуемых в диссертации. Исходя из этого, более целесообразным следует считать совершенствование парокompрессионного цикла или рабочих процессов детандеров, поскольку их начальные базовые показатели значительно лучше. Выбор вихревой трубы в качестве прикладного объекта исследования вызывает вопросы и требует пояснения.
2. В приборостроении вихревые трубы ограничены в применении из-за чрезвычайно высокой шумности. Какие мероприятия предлагает соискатель по снижению шумности?
3. Из текста диссертации не понятно какие конструктивные изменения генератора волн предлагаются, и какие преимущества данные изменения дают.
4. В тексте автореферата и диссертации автором используется эмпирическая константа χ в модели турбулентной вязкости для обрушающихся волн приведена без указания диапазона её возможных значений или зависимости от типа волн. Насколько универсально значение $\chi = 0,02$? Требуется ли его перенастройка для волн с другими параметрами?
5. При описании результатов калибровки модели k - ε -VD для вихревых труб указано, что эмпирическая постоянная c_γ варьировалась в диапазоне от 0 до 1. Было бы полезно пояснить, наблюдалась ли монотонная зависимость изоэнтропного КПД от c_γ и как именно было выбрано её финальное значение?
6. В тексте автореферата и диссертации следовало бы более четко обозначить границы применимости разработанных моделей турбулентности. Например, для каких чисел Рейнольдса и Маха справедлива модель k - ε -VD, и для каких диапазонов волновых чисел применим кинематический критерий обрушения?
7. В ряде случаев соискатель обозначает разрабатываемые уравнения динамики жидкости и газа как новые математические модели. В связи с тем, что предложенные изменения базируются на существующих уравнениях, целесообразно обозначить модели как усовершенствованные.
8. Каким образом согласуется точность математических моделей, разработанных в диссертации, с величиной неопределенности? Оценивалась ли в работе неопределенность измерений? Требуется привести соответствующие сведения.

9. В диссертации предлагается учитывать нелинейные поправки 2-го, 3-го и более высоких порядков в алгоритме перемещения генератора волн. Очевидно, это потребует более высоких мощностей вычислительной техники и более значительного времени расчета. Каким образом оцениваются эти сложности, и что соискатель предлагает для их смягчения?
10. В диссертации рассматриваются задачи гидродинамики и газодинамики. Что объединяет вопросы численного моделирования течений для этих двух направлений?

Отмеченные замечания не снижают ценности и значимости диссертационной работы Хаита Анатолия Вильича.

Заключение

Диссертация Хаита А.В. является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, выполненной самостоятельно на высоком научном уровне и обладающей внутренним единством. В диссертации ясно определены цель и задачи, а также сформулирована и решена научная проблема разработки методологии расчета турбулентных течений жидкости и газа для совершенствования рабочих процессов и характеристик гидропневмоаппаратов. **Решенная научная проблема вносит вклад в энергетическую безопасность и технологическое развитие страны, а следовательно, имеет важное хозяйственное и экономическое значение.** Полученные соискателем результаты достоверны, а выводы и заключения обоснованы. Результаты исследования имеют убедительную практическую значимость, подтвержденную успешным промышленным внедрением. Автореферат и публикации соискателя полностью отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа Хаита Анатолия Вильича полностью соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г.

В соответствии с вышеизложенным считаем, что диссертационная работа «Разработка и реализация методологических основ расчета сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска» отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Хаит Анатолий Вильич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Данный отзыв обсужден и одобрен на заседании Учёного Совета образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО». Протокол № 14 от 19.02.2026. Результаты голосования: за - 15, против - 0, воздержались - 0.

Директор образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы»,
доктор технических наук, профессор,
телефон: +7 (812) 607-02-49
e-mail: ivbaranov@itmo.ru

Докторская диссертация по специальности 01.04.14 – Теплофизика и
теоретическая те.



Баранов Игорь Владимирович

«19» февраля 2026 г.

Учёный секретарь ученого Совета
образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы»

Иконникова Анастасия Юрьевна

«19» февраля 2026 г.

Мы, Баранов Игорь Владимирович и Иконникова Анастасия Юрьевна, даём согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Хаита Анатолия Вильича, и их дальнейшую обработку.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.
Телефон: +7 (812) 480-00-00
Адрес электронной почты: od@itmo.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://itmo.ru/>

С отзывом ознакомлен  А.В. Хаит
27.02.2026