

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию «Разработка и реализация методологических основ расчета сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска» Хаита Анатолия Вильича, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы»

На отзыв представлена диссертационная работа объемом 459 страниц и автореферат объемом 36 страниц. К диссертации приложены три справки о внедрении результатов исследования, три патента РФ на изобретение и полезную модель, два свидетельства о регистрации программы ЭВМ. В автореферате приведен список публикаций соискателя по теме диссертации.

Актуальность темы исследования

Вопросы энергетической безопасности являются ключевым элементом национальной и экономической безопасности, устойчивого развития страны. Основными элементами энергетической безопасности являются надежность, доступность и устойчивость энергоснабжения, модернизация инфраструктуры и энергоэффективность установок и систем. Транспортировка углеводородного топлива (природного газа, нефти, нефтепродуктов) в России осуществляется по трубопроводам, морским, водным и железнодорожным транспортом.

При трубопроводной транспортировке сжатого газа возникает необходимость редуцирования давления газа до потребительского уровня, что сопровождается снижением температуры, обморожением трубопроводов, кристаллизацией тяжелых углеводородов и влаги. Для минимизации негативных последствий редуцирования газа целесообразно применение вихревых устройств, реализующих эффект Ранка, в частности, многопоточных вихревых труб. Для повсеместного применения данной технологии требуется повышение энергоэффективности вихревых труб, а также разработка методик расчета и проектирования соответствующих аппаратов и систем.

Разработка и проектирование морской инфраструктуры транспорта и хранения сжиженного природного газа и других углеводородов связано с выполнением значительного объема лабораторных изысканий. В частности, требуется проведение большого объема испытаний плавучих газовых хранилищ, морских платформ, портовой инфраструктуры, газозовов и танкеров на предмет силового воздействия от набегающих волн, для чего используются специальные генераторы сложных волновых полей. Увеличение точности испытаний и повышение надежности морской инфраструктуры



требуют совершенствования малоизученных рабочих процессов данных поршневых генераторов волн.

Представленное диссертационное исследование направлено на изучение и совершенствование рабочих процессов гидравлических машин и пневматических аппаратов: поршневых генераторов волн и вихревых труб. Исходя из указанного выше, актуальность исследования не вызывает сомнений. Исследование соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ, а также соответствует перечню критических технологий РФ.

Структура и содержание диссертации

Во введении диссертации приводятся общие сведения о работе. Обоснована актуальность работы, определены ее цель и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна и практическая ценность.

В первой главе произведен аналитический обзор опубликованных работ, связанных с изучением и математическим моделированием всех типов турбулентных течений жидкости и газа. Проанализированные теоретические методы и математические модели применимы для расчета работы широкого класса гидравлических и пневматических машин и агрегатов.

Во второй главе выполнен аналитический обзор литературных данных и сформулирована математическая модель течения сжатого воздуха в вихревой трубе (трубе Ранка-Хилша), которая обеспечивает разделение сжатого воздуха, подводимого тангенциально в вихревую камеру через вводные сопла, на горячий и холодный потоки. Выявлены недостатки стандартных моделей турбулентного течения воздуха, одним из которых является неполный учет явления микрохолодильных циклов. Для исправления выявленных недостатков осуществлено изменение уравнений математической модели течения сжатого воздуха. Обсуждены численные методы, используемые для решения полученных уравнений математической модели.

В третьей главе выполнен аналитический обзор литературных данных по проблеме нелинейных поверхностных волн в океане. В том числе, роль поверхностных волн в формировании климата, проблемы морского и прибрежного строительства, морской транспортной инфраструктуры. Литературный анализ показал необходимость проведения большого количества исследований и испытаний инженерных объектов в гидроволновых лабораториях, снабженных поршневыми волнопродукторами. Получены уравнения сопряженной численной модели гидроволнового лотка с волнопродуктором. Обсуждены недостатки численной модели и способы их устранения.

В четвертой главе выполнено численное моделирование эффекта Ранка и рабочих процессов двухконтурной и разделительной конической вихревых труб. Все исследованные стандартные модели турбулентного течения газа занижают эффект температурного разделения примерно на 30%, что также подтверждается литературными данными. В то же время, разработанная математическая модель на базе измененных уравнений сокращает отклонение от экспериментальных данных до 10% и менее. Данный результат следует считать существенным.

Пятая глава посвящена экспериментальному подтверждению математической модели, параметрическому исследованию влияния основных геометрических и эксплуатационных параметров вихревой трубы на ее характеристики, а также разработке новых узлов вихревой трубы. В конце главы приводятся сведения о промышленной верификации и внедрении результатов исследования.

В шестой главе выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование течения жидкости в гидроволновом лотке с волнопродуктором. Пользуясь результатами экспериментальных исследований, уравнения математической модели были дополнены кинематическим критерием обрушения волн для повышения точности описания диссипация энергии волны в гидродинамическую турбулентность. Экспериментально доказана высокая точность откалиброванного кинематического критерия и соответствующей модели течения жидкости в гидроволновом лотке с волнопродуктором.

В седьмой главе теоретически исследуется работа волнопродуктора. Аналитически получены два новых слабо-нелинейных алгоритма управления волнопродуктором, в основу которых положены хорошо разработанные теоретические модели слабо-нелинейных поверхностных волн, а именно уравнения Захарова и Шредингера. Использование данных уравнений дало рост точности генерации целевого волнового поля. В конечном виде, алгоритмы сформулированы в виде компьютерных программ на языках Matlab, Python и C++.

В восьмой главе выполнена экспериментальная валидация новых слабо-нелинейных алгоритмов управления волнопродуктором. Экспериментально установлено отклонение экспериментально измеренной амплитуды волны от целевой величины, в некоторых случаях достигающее 15%. Разработанная математическая модель течения жидкости показала, что это отклонение вызвано турбулентными течениями вблизи поверхности поршневого генератора волн. Для исправления ошибки была введена эмпирическая корректировка передаточной функции. Итоговые экспериментальные исследования подтвердили высокую точность алгоритмов управления

волнопродуктором на базе уравнений Захарова и Шредингера с учетом эмпирической корректировки передаточной функции.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, содержащихся в диссертации, подтверждена использованием фундаментальных методов механики жидкости и газа, математического анализа и теории планирования эксперимента. Также достоверность подтверждается сопоставлением с натурными экспериментальными исследованиями, проведенными соискателем лично или заимствованными из литературы.

Научная новизна результатов исследований

- Научная новизна заключается, прежде всего, в изменениях уравнений математической модели течений жидкости и газа, которые позволили более точно отразить физику процессов, протекающих в данных течениях. В уравнении энергии впервые учтен турбулентный поток энергии, связанный с микрохолодильными циклами, который дополнил ранее учтенные турбулентные потоки.
- Результаты экспериментальной калибровки, верификации и валидации разработанных моделей течения жидкости и газа. Погрешность прогноза величины изоэнтропного КПД вихревой трубы снижена до $2\div 10\%$. В то же время, погрешность описания обрушения волн, полученных поршневым генератором, снижена до 0.55% .
- Разработаны и запатентованы новые элементы вихревой трубы. Сформулированы методики их расчета и математического моделирования. Получены рекомендации по определению эффективных геометрических параметров вихревой камеры и режимных параметров работы вихревой трубы.
- Новые теоретические методы и алгоритмы управления поршневым волнопродуктором, которые более полно раскрывают протекающие нелинейные физические процессы. Тем самым достигнуто существенное улучшение рабочих характеристик генератора волн.

Практическая ценность

Один из главных практических результатов исследования заключается в увеличении энергоэффективности промышленных вихревых труб, а именно в повышении изоэнтропного КПД примерно на 5% . Как отмечается в диссертации, этот результат подтвержден на заводских испытаниях

достаточного количества промышленных образцов вихревых труб разных размеров и назначения.

Алгоритмы управления поршневым волнопродуктором внедрены в лаборатории поверхностных волн Тель-Авивского университета. Экспериментально установлена высокая точность воспроизведения поля поверхностных волн, описываемая среднеквадратичным отклонением формы волны не более 1%.

Получен ряд патентов на изобретение (№2533590, 2406952) и полезную модель (№124367), свидетельства о регистрации программ ЭВМ (№2025669129, 2025669130). Приложенные к диссертации справки о внедрении указывают на промышленную реализацию результатов исследования в конструкторском бюро ООО “КБ “ЧКЗ–ЮГСОН” и АО “КЭНПО”, а также в лаборатории Тель-Авивского университета.

Результаты исследования рекомендуются к внедрению другими предприятиями и организациями, занимающимися проектированием и производством соответствующих гидравлических машин и пневматических аппаратов. Данная рекомендация также формулируется в справках о внедрении.

Соответствие диссертации требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней» и паспорта научной специальности

По теме диссертации опубликовано 54 научные работы:

- 21 статья в изданиях Белого списка, включенных в базы цитирования WoS и Scopus (11 статей в изданиях Q1, 10 статей в изданиях Q2-Q4);
- 11 статей в изданиях из списка ВАК;
- 15 научных статей в других изданиях;
- 3 патента РФ
- 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

В диссертации решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, а также предложены новые научно обоснованные технические решения, вносящие значительный вклад в развитие страны. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения. В диссертации приведены сведения об убедительном промышленном внедрении научных результатов.

Таким образом, диссертация Хаита Анатолия Вильича отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с пп. 9-14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней».

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы». Направления исследований по пунктам 1-5.

Замечания по диссертации

1. Среди различных разновидностей вихревых труб, особое место занимают так называемые многопоточные трубы, используемые для охлаждения и последующей сепарации газожидкостных смесей. Они широко востребованы на нефтегазовых месторождениях, на газораспределительных пунктах (для изотермического редуцирования газа) и в других отраслях промышленности. По непонятной причине эта область исследования в диссертации полностью игнорируется без пояснений. Считаю это недостатком, ограничивающим выводы и результаты, а также практическую значимость.

2. Соискатель сравнивает результаты численных расчетов с экспериментами для различных вихревых труб: таблицы 4.3, 4.6, 4.7, другие графики и таблицы. Однако приводятся только расчетные данные самого диссертанта. Очевидно, что сравнение с расчетными данными других исследователей повысило бы ценность работы. Считаю, что потенциал исследования раскрыт не полностью.

3. Отличия между расчетными и экспериментальными данными на графике 4.12 слишком значительны. Это вызывает вопросы.

4. Новый тип соплового ввода вихревой трубы, обсуждаемый в разделе 5.3.1, представляет интерес. Однако вопросы вызывает предложенная методика его расчета с использованием уравнений (5.18). Очевидно, что решение данных чересчур упрощенных уравнений отклоняется от более сложных математических моделей трехмерного течения, что отчетливо показано на рис. 5.19. Требуется доработка методики путем исправления недостатков. Столь высокое отклонение нельзя считать допустимым даже для инженерных оценок.

5. Сравнивая рис. 5.17 и 5.18 можно заметить, что предложенный сопловой ввод отличается от стандартного количеством направляющих лопаток. Почему этот вопрос не обсуждается в диссертации? Какую роль играет количество лопаток?

6. Векторные поля течения, показанные на рис. 8.4, по всей видимости, имеют существенное значение в исследовании. Однако из данного рисунка сложно что-либо узнать о течении кроме его нестационарного характера. Требуется ввести некоторые числовые характеристики, указывающие на особенности течения, которые имеют особую важность, ради которых и приводится данный рисунок.

Заключение.

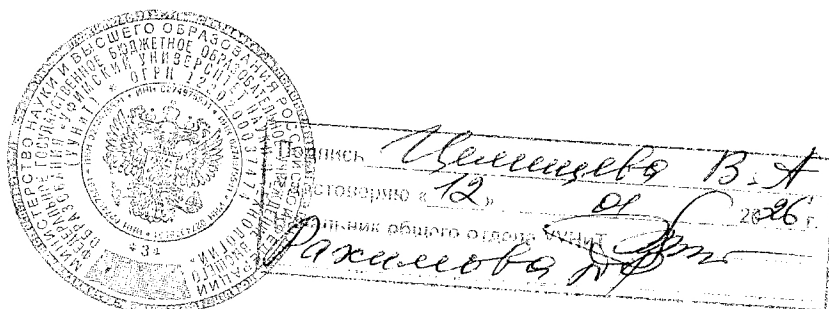
Диссертация Хаита Анатолия Вильича «Разработка и реализация методологических основ расчета сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска» посвящена актуальной теме, написана на высоком научном уровне, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема усовершенствования гидропневмоаппаратов и повышения их энергоэффективности, имеющая важное хозяйственное значение. Результаты исследования находят успешное применение на практике.

Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пунктами 9-14 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Хаит Анатолий Вильич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы».

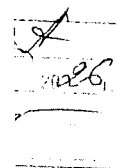
Официальный оппонент,
Целищев Владимир Александрович,
доктор технических наук по специальности
2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»,
профессор кафедры прикладной гидромеханики
федерального государственного бюджетного
учреждения высшего образования «Уфимский
научно-технологический университет» (УУНиТ)
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12
Тел.: +7 (908) 350-22-94
E-mail: pgl.ugatu@mail.ru

« 12 » января 2026 г.



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)
450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, дом 32
Тел.: +7-347-229-96-16, +7-987-272-63-70
E-mail: rector@uust.ru

Я, Целищев Владимир Александрович, даю согласие на включение своих
персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ханта
Анатолия Вильича, и их дальнейшую обработку.



С с

Н

2.02