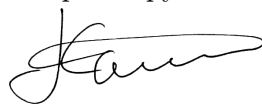


На правах рукописи



ХАИТ АНАТОЛИЙ ВИЛЬИЧ

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ОДНО-
И ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ГИДРО- И ПНЕВМОАППАРАТАХ
НА ОСНОВЕ ГИПОТЕЗЫ БУССИНЕСКА

Специальность 2.5.10 — Гидравлические машины, вакуумная,
компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный консультант:

Щерба Виктор Евгеньевич

заслуженный работник Высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

Жарковский Александр Аркадьевич

доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ).

Целищев Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной гидромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ).

Месропян Арсен Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор отделения математики, физики и машиноведения Академии наук Республики Башкортостан, директор Института экосистем бизнеса и креативных индустрий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Защита состоится 18 марта 2026 г. в 13–00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02 на базе ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира 11, главный корпус, ауд. П-202.

Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/68397/>; в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: https://omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/khait-a-v-2-5-10/

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира 5, ауд. 1.108. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

Автореферат разослан «17» декабря 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



Тетерина
Ирина Алексеевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Сложные закрученные турбулентные одно- и двухфазные течения, возникающие в различных гидравлических и пневматических аппаратах, тяжело поддаются математическому описанию и моделированию. Отсутствие фундаментальной теории турбулентности требует вовлечения упрощений, эмпирических поправок и параметризаций, называемых моделями турбулентности. В свою очередь, введение эмпирических данных в математические модели приводит к неполному пониманию физических процессов, наблюдаемых в течениях жидкости и газа и определяющих рабочие процессы гидропневмоаппаратов. В связи со сложностью и неполной изученностью указанных физических процессов, погрешность прогнозирования интегральных характеристик гидропневмоаппаратов, таких как вихревые трубы Ранка-Хилша или поршневые волнопродукторы возвратно-поступательного действия, может превышать 15...30%.

Современные вихревые трубы широко применяются в промышленности, в том числе в установках сепарации попутного нефтяного газа, сжижения природного газа, охлаждения бурового раствора, в установках нагрева воздуха и др. Они характеризуются относительно низкой величиной холодильного КПД порядка $\eta_c \sim 0.2...0.22$, а их функционирование обеспечивается компрессорными станциями большой мощности.

Отсутствие точных и достоверных методик математического моделирования рабочих процессов (течений жидкости и газа) и интегральных характеристик вихревых труб выступает ограничивающим фактором совершенствования последних с целью повышения их энергетической эффективности. С учетом широкого распространения вихревых труб в промышленности, повышение холодильного КПД даже на 3...5% потенциально приведет к экономии энергии, потребляемой компрессорными станциями, в десятки МВт. В связи с этим, проблему повышения энергоэффективности вихревых труб следует считать актуальной и имеющей важное хозяйственное значение для развития страны.

С другой стороны, особенную важность для развития страны играют вопросы судоходства и морского строительства. Проектирование судов, объектов прибрежной инфраструктуры, объектов береговой защиты, морских платформ, плавучих газовых хранилищ и других инженерно-технических сооружений требует проведения физических (натурных) испытаний в специальных гидроволновых лабораториях страны. Генерация проектного волнения в гидроволновых лотках осуществляется при помощи программно управляемых поршневых волнопродукторов, преобразующих механическую энергию возвратно-поступательного движения в гидравлическую энергию поверхностных волн.

Современные волнопродукторы характеризуются значительными отклонениями в форме генерируемых поверхностных волн, которые могут превышать 15%, а физическая природа возникающих ошибок остается неизвестной. С учетом того, что энергия поверхностных волн пропорциональна квадрату высоты волны, ошибки работы волнопродуктора могут приводить к большим погрешностям определения как силового воздействия от наката волн на объект, так и

других проектных параметров. А следовательно, к высокому риску неверного выбора проектного решения и тяжелым последствиям такого выбора. Особая важность гидроволновых лабораторий для развития судоходства и морского строительства страны указывает на актуальность научной проблемы существенного повышения точности генерации волн волнопродукторами.

Решение указанных актуальных проблем, имеющих важное хозяйственное значение для развития страны, невозможно без развития методов математического моделирования сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа с целью минимизации погрешности прогнозирования интегральных характеристик гидропневмоаппаратов. Для этого требуется более глубокое понимание физических процессов, определяющих работу данных гидропневмоаппаратов. Этим вопросам посвящена настоящая диссертация.

Степень разработанности проблемы

Рассматриваемые научные проблемы изучались различными коллективами и научными школами на протяжении десятилетий: А.И. Леонтьев, О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов (РГУ НГ), С.А. Исаев (СПбГУ ГА), Г.М. Моргунов (МЭИ), А.А. Жарковский (СПбПУ), И.О. Хинце, Ф. Харлоу, В.Е. Launder, D.B. Spalding, Н. Jasak, F.R. Menter, G.J. Reece, W. Rodi, А.П. Меркулов (КуАИ), М.Г. Дубинский (МАИ), В.С. Мартыновский (ОТИХП), В.М. Бродянский (МЭИ), А.Д. Суслов (МВТУ), А.В. Мартынов (МЭИ), А.А. Халатов (ИТТФ НАНУ), В.И. Метенин (КПТИ), А.И. Азаров (ЛПИ), Ш.А. Пиралишвили (РГАТУ), В.И. Кузнецов (ОмГТУ), М.А. Жидков, В.А. Целищев (УУНиТ), М.Х. Правдина (ИТ СО РАН), В.А. Арбузов (ИТ СО РАН), Г.Н. Бобровников (МВТУ), Н.А. Прибатурин (ИТ СО РАН), J.J. Van Deemter, R.G. Deissler, M. Perlmutter, R. Liew, A. Bazgir, J. Lagrandeur, S. Poncet, N.J. Dyck, K. Dincer, S.E. Rafiee, B. Kobiela, J.J. Derksen, T. Farouk, A. Gutsol, A. Secchiaroli, R. Ricci, N. Bej, R. Oberti, M. Baghdad, И.С. Нуднер (БГТУ Военмех), К.К. Семёнов (СПбПУ), Г.С. Хакимзянов (КГУ), Ю.Н. Захаров (ИВТ СО РАН), Л.Б. Чубаров (ИВТ СО РАН), Ю.И. Шокин (ИВТ СО РАН), А.А. Коробкин (Институт гидродинамики СО РАН), С.И. Бадулин (ИО РАН), Е.Н. Пелиновский (НГТУ), Ю.И. Троицкая (ИПФ РАН), А.В. Слюняев (ИПФ РАН), Д.А. Сергеев (ИПФ РАН), К.Е. Афанасьев (КемГУ), С.В. Стуколов (КемГУ), О.И. Гусев (ИВТ СО РАН), Н.А. Schaffer, T. Waseda, P.H. Taylor, T.A.A. Adcock, L. Shemer, D. Liberzon, V. Shrira, S.T. Grilli, M.P. Tulin, C. Swan, J. Spinneken, Z. Tian, M. Perlin, G. Ducrozet, V. Sriram, J.H. Duncan, W.K. Melville, M.L. Banner, R.J. Rapp, W. Bai, L. Qian, Z. Ma и другие научные группы и школы.

В качестве основных достижений можно выделить: создание теоретической базы и математических методов расчета многомерных течений жидкости и газа в гидропневмоаппаратах; создание теоретической базы вихревого эффекта; создание критериальных уравнений расчета вихревых труб; разработка и внедрение серии устройств, использующих вихревой эффект; создание линейной и слабонелинейных теорий волнопродуктора; разработка и внедрение алгоритмов числового управления волнопродукторами.

Несмотря на большое количество проведенных исследований, научные проблемы, рассмотренные выше по тексту, остаются не решенными по настоящее время. Исходя из этого, формулируется цель и ряд задач исследования.

Целью исследования является разработка методологии расчета и математического моделирования сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидропневмоаппаратах на основе усовершенствованных моделей турбулентности (*п.1-3 паспорта специальности*), и применение разработанных подходов для совершенствования гидравлических и пневматических устройств, включая алгоритмы автоматизированного управления ими (*п.4-5 паспорта специальности*).

Объектом исследования являются рабочие процессы гидро- и пневмоаппаратов со сложными закрученными вихревыми одно- и двухфазными течениями жидкости и газа.

Предметом исследования являются математические модели и методология расчета сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа, связывающие рабочие процессы гидро- и пневмоаппаратов с их интегральными характеристиками.

Для достижения поставленной цели **решаются следующие задачи:**

1. Разработать значительно усовершенствованные модели турбулентных течений жидкости и газа, которые позволят более точно отразить физические процессы, определяющие работу гидропневмоаппаратов (вихревой трубы и поршневого волнопродуктора), а следовательно повысить точность прогнозирования их интегральных характеристик.
2. Разработать современные компьютерные программы для реализации усовершенствованных математических моделей турбулентных течений с применением методов параллельных вычислений для их использования на суперкомпьютерных системах (вычислительных кластерах).
3. На основе проведенных экспериментальных исследований, выполнить калибровку и валидацию разработанных моделей турбулентных течений жидкости и газа.
4. Используя разработанные математические модели, провести детальные численные и экспериментальные исследования течений жидкости и газа в проточных частях вихревой трубы и волнопродуктора гидроволнового лотка с целью раскрытия основных физических принципов и закономерностей протекающих процессов.
5. Используя современные методы планирования эксперимента, провести детальные вычислительные и лабораторные исследования влияния основных геометрических и эксплуатационных параметров на энергоэффективность вихревой трубы. На основании результатов исследований разработать новые конструкции узлов вихревой трубы для повышения ее энергоэффективности.
6. Разработать слабонелинейные алгоритмы автоматизированного управления поршневыми и шарнирно закрепленными волнопродукторами, предназначенные для значительного повышения точности генерации поверхностных

волн в лабораторных гидроволновых лотках (для повышения точности лабораторных испытаний на силовое воздействие от наката волн).

7. Раскрывая физику процессов, протекающих при работе волнопродуктора, используя разработанные математические модели течений жидкости и газа, разработать методы эмпирической корректировки слабонелинейных алгоритмов автоматизированного управления волнопродукторами для повышения точности генерации волн.

Научная новизна

1. На основании выявленных недостатков, разработаны значительно усовершенствованные математические модели сложных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа, которые более точно отражают физику происходящих процессов. Математические модели учитывают впервые введенный турбулентный поток энергии q_γ , связанный с эффектами сжимаемости жидкости и дополняющий ранее учтенные турбулентные потоки q_σ и q_λ . Установлено, что вклад q_γ в энергообменные процессы достигает $\sim 30\%$ и хорошо согласуется с гипотезой взаимодействия вихрей. Математические модели также учитывают кинематический критерий, который верно отражает физику обрушения волн, что впервые экспериментально доказано в работе. (*п.1 паспорта специальности*)
2. Проведена калибровка и детальная верификация усовершенствованных моделей турбулентных течений по отношению к серии лабораторных измерений, выполненных, в том числе, с использованием нового метода синхронизации вычислительных и лабораторных экспериментов. Успешная верификация моделей, использованных для расчета сложных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости в гидропневмоаппаратах, подтвердила существенное повышение точности прогнозирования интегральных характеристик вихревых труб и поршневых волнопродукторов. Погрешность прогноза величины изоэнтропного КПД вихревой трубы снижена с $\sim 30\%$ до $\sim 2...10\%$. Погрешность определения пространственной координаты обрушения волны, сгенерированной волнопродуктором, снижена до $0.15...0.55\%$ от длины гидроволнового лотка. (*п.1,3 паспорта специальности*)
3. На основании новых знаний о структуре сложных турбулентных течений, полученных используя разработанные математические модели и лабораторные измерения, выявлены новые физические явления. Применяя метод минимизации порождения энтропии для анализа результатов математического моделирования было установлено существование паразитной области течения в камере энергоразделения вихревой трубы. Обнаружен эффект дестабилизации течения в сверхзвуковом сопловом вводе и спрямляющем лопаточном аппарате холодного потока. Использование разработанной математической модели позволило впервые обнаружить формирование сложных нестационарных вихревых течений вблизи волнопродуктора, вызванных его функционированием. Впервые обнаружен физический эффект “фазовой синхронизации” (phase locking effect), вызванный турбулентными течениями, порожденными обрушением поверхностных волн. (*п.3,4 паспорта специальности*)

4. Проведена серия вычислительных экспериментов на базе разработанных математических моделей и плана эксперимента для совершенствования рабочих процессов вихревых труб за счет изменения основных геометрических и эксплуатационных факторов. Установлено, что уменьшение диаметров камеры энергоразделения позволяет исключить паразитную область течения и, тем самым, повысить КПД вихревой трубы. Для верификации результатов вычислительных экспериментов создан оригинальный экспериментальный стенд и проведены измерения интегральных характеристик вихревой трубы в двухконтурном и разделительном режимах работы, которые подтвердили рост КПД. (*п.1,3,4 паспорта специальности*)
5. Применение созданных математических моделей позволило разработать ряд усовершенствований вихревой трубы, имеющих большое практическое значение. Предложен и разработан принципиально новый способ формирования сверхзвукового винтового течения и соответствующий ему новый тип соплового ввода вихревой трубы. Предложен и разработан новый способ эффективного торможения высокоскоростного холодного потока вихревой трубы за счет установки спрямляющего лопаточного аппарата. Численно и экспериментально установлено, что внедрение разработанных усовершенствований вихревой трубы позволяет увеличить ее изэнтропный КПД в режиме наибольшей холодопроизводительности на $\sim 4...5\%$ (в отдельных случаях до $\sim 7\%$). (*п.1,2,4 паспорта специальности*)
6. Разработаны принципиально новые слабонелинейные алгоритмы автоматизированного управления поршневым и шарнирно закрепленным волнопродуктором, опирающиеся на решения нелинейных уравнений Захарова и Шредингера. Применение уравнений Захарова и Шредингера в новых алгоритмах управления волнопродуктором взамен стандартных аналитических подходов позволило повысить точность генерации волн за счет впервые учтенных нелинейных поправок 3-го порядка нелинейности. (*п.2,4,5 паспорта специальности*)
7. Опираясь на новые знания о структуре обнаруженных сложных нестационарных вихревых течений, формирующихся вблизи волнопродуктора, предложен метод их учета путем введения эмпирической корректировочной функции β в слабонелинейные алгоритмы на базе уравнений Захарова и Шредингера. Разработан оригинальный итерационный метод поиска числовых значений функции β на основе математических моделей сложных течений жидкости и газа. Совокупность новых разработок позволила минимизировать погрешность генерации поверхностных волн до среднеквадратичного отклонения $0.5...1\%$. (*п.1,4,5 паспорта специальности*)

Теоретическая значимость

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость учета впервые введенного полуэмпирического турбулентного потока энергии q_γ , который вносит вклад порядка $\sim 30\%$ в эффект энергоразделения в вихревой трубе Ранка-Хилша. Теоретически показано, что турбулентный поток энергии q_γ составляет неотъемлемую частью гипотезы взаимодействия

вихрей, что является дополнительным подтверждением верности данной гипотезы.

2. Теоретически и экспериментально доказана гипотеза о том, что обрушение поверхностных волн возникает в тот момент времени, когда лагранжева скорость жидкой частицы на гребне волны сравнивается или начинает превышать скорость самого гребня: $V_{fl} \geq V_{cr}$. На основании доказанной гипотезы сформулирован и откалиброван кинематический критерий обрушения поверхностных волн, являющийся неотъемлемой частью модели сложного течения в гидроволновом лотке с волнопродуктором.
3. Используя указанные выше экспериментально подтвержденные теоретические результаты и опираясь на глубокий физико-математический анализ рабочих процессов гидропневмоаппаратов (вихревых труб и поршневых волнопродукторов), разработаны теоретические основы и получены математические уравнения моделей сложных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа, наблюдаемых в исследуемых гидропневмоаппаратах. Экспериментально показано, что численное решение уравнений полученных моделей течений жидкости и газа дает существенный рост точности прогнозирования интегральных характеристик вихревых труб и поршневых волнопродукторов.
4. Для преодоления ограничений существующих теорий рабочих процессов волнопродуктора (таких как повсеместно используемая теория 2-го порядка нелинейности Шаффера), предложены и разработаны принципиально новые теории волнопродуктора на базе нелинейных уравнений Захарова и Шредингера. В связи с тем, что уравнение Шредингера ограничено 3-им порядком нелинейности, а уравнение Захарова не имеет ограничений по порядку нелинейности, предложенный новый теоретический подход позволил преодолеть ограничения существующих теорий волнопродуктора через впервые учтенные нелинейные поправки 3-го и даже более высоких порядков нелинейности.
5. Используя разработанные теоретические методы и модели, впервые обнаружены и исследованы физические явления, важные для инженерной практики: формирование паразитной области течения в камере энергоразделения вихревой трубы; эффект дестабилизации течения в вихревой трубе; явление “фазовой синхронизации”, возникающее при обрушении поверхностных волн; впервые обнаружено формирование сложных нестационарных вихревых течений вблизи волнопродуктора, вызванных его функционированием.
6. Совокупность экспериментально подтвержденных теоретических разработок привела к созданию методологических основ расчета сложных течений жидкости и газа, практическая реализация которых создала новые инструменты совершенствования рабочих процессов вихревых труб и поршневых волнопродукторов.

Практическая ценность

1. На основании проведенного анализа и раскрытия физических процессов, протекающих в сложных закрученных турбулентных течениях, разработаны усовершенствования вихревой трубы и ее узлов, которые позволили увели-

чить величину изоэнтропного КПД в режиме наибольшей холодопроизводительности на $\sim 4...5\%$. В том числе, разработан и защищен патентом на изобретение (№2533590) сверхзвуковой сопловой ввод вихревой трубы нового типа. Запатентованы ряд других изобретений и полезных моделей (№2406952, №124367).

2. Учет впервые полученных нелинейных поправок 3-го порядка нелинейности в рамках теории волнопродуктора на базе уравнений Захарова и Шредингера, а также предложенной оригинальной эмпирической корректировочной функции β , позволил разработать новые высокоточные алгоритмы автоматизированного управления поршневым и шарнирно закрепленным волнопродуктором, которые защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ №2025669129 и №2025669130.
3. Разработанные алгоритмы автоматизированного управления волнопродуктором используются на практике в лаборатории поверхностных волн Тель-Авивского университета для управления шарнирно закрепленным волнопродуктором большого гидроволнового лотка, что закреплено в приложенной справке о внедрении.
4. Результаты исследования были использованы в конструкторском бюро ООО “КБ “ЧКЗ–ЮГСОН” и АО “КЭНПО” при проектировании и изготовлении широкой линейки вихревых труб и других гидропневмоаппаратов, в том числе: ВТ 3-6, ВТ 5-90, ВТ 30Р, РЕСШ.4414, ВТ 30-50, ДВТР 40-9000, ВТ 63Р и др. К диссертации приложены соответствующие справки о внедрении.
5. Усовершенствованные модели сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа вошли в состав разработанных высокопроизводительных компьютерных программ, базирующихся на современных численных алгоритмах (методы конечных объемов, граничных элементов, распределенных вычислений и др.).
6. Отдельные части диссертации использовались соискателем при подготовке лекционного материала в рамках обучения студентов технических специальностей в двух университетах: ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет и Ариэльский университет (Израиль).

Методы исследований

В диссертации использована комбинация взаимодополняющих методов теоретических и экспериментальных исследований, методов анализа течений жидкости и газа, термодинамики и теплообмена. Теоретический анализ основывается на методах дифференциального и интегрального исчисления, дополненных методами возмущения и разложения по малому параметру. В численном анализе использовались современные версии Метода Контрольных Объемов и Метода Граничных Элементов. При проведении экспериментальных исследований использовались методы статистической обработки результатов для оценки неопределенности измерений.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается:

- использованием основных фундаментальных уравнений сохранения массы, момента движения, энергии, а также уравнений состояния, в математических моделях;
- корректным использованием современных численных методов (методы конечных объемов, граничных элементов, распределенных вычислений);
- детальной верификацией результатов численного исследования по отношению к лабораторным измерениям, которая качественно и количественно подтвердила результаты математического моделирования;
- использованием апробированных методов планирования и проведения экспериментов, а также анализа экспериментальных результатов.

Работа выполнена при поддержке следующих грантов:

1. Гранты на проведение научных исследований молодыми учеными и аспирантами Уральского федерального университета, 2010–2011 гг.
2. Грант Российской Академии Архитектуры и Строительных Наук, институт “УралНИИпроект РААСН”, № Д-23/13, 2013–2015 гг. Тема: Исследование инновационных энергоэффективных систем климатизации на базе вихревой трубы. Исполнитель.
3. Грант Министерства науки, технологий и космоса Израиля, № 3-12473, 2015–2019 гг. Тема: Исследование неоднородных ветровых волн при стационарном и/или нестационарном воздействии. Исполнитель в рамках постдокторантуры, Тель-Авивский университет (Израиль).
4. Грант исследовательского совета по инженерным и физическим наукам (EPSRC, Англия), № EP/S011862/1, 2019–2021 гг. Тема: Высокоточное моделирование захвата воздуха при воздействии обрушивающихся волн на сооружения. Исполнитель в рамках постдокторантуры, Университет Манчестер Метрополитен (Англия).

Положения, выносимые на защиту

1. На основе полученных новых знаний о физических процессах, наблюдаемых в сложных течениях жидкости и газа, предложены усовершенствования моделей турбулентности для расчета и прогнозирования интегральных характеристик вихревых труб и поршневых волнопродукторов. (*п.1,3 паспорта специальности*)
2. Методологические основы расчета и математического моделирования рабочих процессов исследуемых гидропневмоаппаратов. (*п.1,2 паспорта специальности*)
3. Результаты численного и экспериментального анализа рабочих процессов исследуемых гидропневмоаппаратов. Новые знания о структуре турбулентного течения в проточной части вихревой трубы и поршневого волнопродуктора, полученные, в том числе, при помощи метода минимизации порождения энтропии. (*п.1,3,4 паспорта специальности*)
4. Впервые обнаруженные физические явления, а также их влияние на рабочие процессы и интегральные характеристики исследуемых гидропневмоаппаратов. (*п.4 паспорта специальности*)

5. Новые элементы проточной части вихревой трубы и их конструкции, полученные в результате применения разработанных математических методов и моделей (предложен и запатентован принципиально новый тип соплового ввода вихревой трубы, а также методика его расчета и моделирования; новый способ повышения энергоэффективности вихревой трубы путем установки спрямляющего лопаточного аппарата для эффективного торможения холодного потока). (*п.1,2,4 паспорта специальности*)
6. Принципиально новые слабонелинейные алгоритмы автоматизированного управления поршневым и шарнирно закрепленным волнопродуктором, отличающиеся повышенной точностью за счет учета поправок 2-го и 3-го порядков нелинейности (алгоритмы внедрены в систему управления лабораторными волнопродукторами, а также зарегистрированы в Роспатенте). (*п.2,4,5 паспорта специальности*)
7. Новый метод повышения точности генерации поверхностных волн волнопродуктором на основе разработанных моделей течений жидкости и газа за счет внесения эмпирических корректировок в слабонелинейные алгоритмы автоматизированного управления волнопродуктором. (*п.1,4,5 паспорта специальности*)

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на 8-и международных научных конференциях: ISOPE 2020 (Китай); ASME OMAE 2019 (Великобритания); ASME OMAE 2018 (Испания); ICME 2018 (Израиль); WISE 2018 (Израиль); CONVR 2013 (Великобритания); ICCBE 2012 (Россия); ICMEME 2012 (Китай).
- на 4-х всероссийских научно-технических конференциях (Москва, Самара, Екатеринбург);
- на 9-ти международных семинарах: University of Plymouth (Великобритания, 2022); SRM Institute of Science and Technology (Индия, 2022); Сибирское отделение РАН (ФИЦ ИВТ, Новосибирск, 2021); Ariel University (Израиль, 2020); Tel Aviv University (Израиль, 2020); Keele University (Великобритания, 2020); Queen's University Belfast (Великобритания, 2019); Manchester Metropolitan University (Великобритания, 2019); Tel Aviv University (Израиль, 2018).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 54 печатных труда:

- 21 статья в изданиях «Белого списка» (Единого государственного перечня научных изданий), включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus, из них 11 статей в изданиях Q1 (1-го уровня);
- 11 статей в ведущих рецензируемых журналах и научных изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией РФ;
- 15 статей в других изданиях;
- 3 патента Российской Федерации и 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя в работу

Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, были выполнены соискателем лично или при его непосредственном участии. Некоторая часть результатов была получена студентами при работе над дипломными проектами и магистерскими диссертациями под непосредственным руководством соискателя и в его соавторстве. Материалы диссертации основаны на исследованиях соискателя, выполненных за период 2009–2025 гг.

Объем и структура работы

Диссертация изложена на 459 страницах, в том числе 375 страниц основного текста, состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и восьми приложений. В работе содержится 150 рисунков, 25 таблиц. Библиографический список включает 427 наименований.

Содержание работы

В **первой главе** приведен литературный анализ современного состояния методов расчета и математического моделирования турбулентных течений жидкости и газа. В том случае, если жидкость представляет собой сплошную среду, течение описывается фундаментальными уравнениями сохранения массы, момента движения (уравнение Навье-Стокса), энергии, а также уравнениями состояния. Векторное уравнение Навье-Стокса записывается следующим образом:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau, \quad (1)$$

где $V = \{V_x, V_y, V_z\}$ - вектор скорости жидкости, ρ - плотность, p - статическое давление, g - ускорение свободного падения, а τ - тензор напряжений жидкости. С увеличением скорости жидкости $|V|$ наблюдается рост безразмерного числа Рейнольдса $Re = |V|L/\nu$, где L - характерный размер задачи, а $\nu = \mu/\rho$ - кинематическая вязкость жидкости, μ - динамическая вязкость жидкости. Рейнольдсом было показано, что превышение Re некоторого критического порога $Re_{кр}$ приводит к кардинальному перестроению течения, а именно, к его переходу в турбулентный режим.

Турбулентные течения представляют собой чрезвычайно сложный хаотический процесс, теория которого не разработана. Отсутствие теоретических основ ставит остро проблему разработки методов инженерного расчета и математического моделирования турбулентных течений жидкости и газа, опирающихся на приближенное решение уравнения Навье-Стокса (1). Для этого, турбулентную часть течения, вычислить которую не представляется возможным, требуется отфильтровать используя метод осреднения Рейнольдса:

$$V(x, y, z, t) = \langle V \rangle(x, y, z, t) + V'(x, y, z, t), \quad (2)$$

где $\langle V \rangle$ - средняя медленно меняющаяся компонента течения, которую требуется вычислить, а $V'(x, y, z, t)$ - быстро меняющаяся хаотическая турбулентная часть течения, влияние которой требуется аппроксимировать эмпирически.

Подстановка (2) в уравнение Навье-Стокса (1) приводит к появлению тензора напряжений Рейнольдса $\Pi \sim \langle V'_i V'_j \rangle$ дополнительно к тензору напряжений τ . Причем, согласно реологическому закону вязкого трения Ньютона, напряжения τ пропорциональны тензору скоростей деформаций $\dot{S} = 0.5 (\nabla V + (\nabla V)^T)$ с коэффициентом пропорциональности μ . С другой стороны, аналогичного фундаментального закона для напряжений Рейнольдса нет. Буссинеском была сформулирована гипотеза о том, что в некотором приближении напряжения Рейнольдса также пропорциональны тензору скоростей деформаций:

$$\tau = \mu \left(\nabla V + (\nabla V)^T - I \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) ; \quad \Pi = \mu_t \left(\nabla V + (\nabla V)^T - I \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \quad (3)$$

В отличие от коэффициента динамической вязкости μ , являющегося физическим свойством жидкости, турбулентная вязкость $\mu_t(x, y, z, t)$ не является постоянной и характеризует локальные свойства турбулентности в течении. Для ее вычисления требуются полуэмпирические модели турбулентности.

Подстановка (3) в (1) приводит к уравнению Рейнольдса, описывающему поведение осредненной компоненты течения $\langle V \rangle \rightarrow V$ в некотором приближении (с учетом эмпирического вклада турбулентности). Дополняя уравнение Рейнольдса уравнением неразрывности, можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) &= 0 \\ \rho \frac{DV}{Dt} &= \rho g - \nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla V + (\nabla V)^T) + \underbrace{\nabla \cdot (\mu_t (\nabla V + (\nabla V)^T))}_{\text{турбулентность}} \end{aligned} \quad (4)$$

В некоторых особых случаях, осредненное течение $\langle V \rangle \rightarrow V$ близко к потенциальному и может быть задано пользуясь величиной потенциала φ :

$$\vec{V} = -\vec{\nabla} \varphi \quad (5)$$

К таким типам течений относятся, например, бегущие поверхностные волны на воде. Течения жидкости, связанные с поверхностными волнами, в достаточной степени приближения являются потенциальными. Однако обрушение гребней волн приводит к порождению турбулентной компоненты V' , согласно (2).

Принимая во внимание несжимаемость жидкости (воды, $\rho = \text{const}$) и подставляя (5) в (4) можно записать систему уравнений для турбулентного квазипотенциального течения жидкости в задачах о распространении волн по поверхности воды с учетом их взаимодействия с инженерными сооружениями. При этом, уравнение неразрывности превращается в линейное уравнение Лапласа, а уравнение Рейнольдса записывается как нелинейное уравнение Бернулли с эмпирической поправкой на турбулентность:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= 0 \\ \frac{D\varphi}{Dt} &= gz - \frac{1}{2} |\nabla \varphi|^2 + \frac{p}{\rho} + \underbrace{2\nu_t \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2}}_{\text{турбулентность}} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь вводится кинематический коэффициент турбулентной вязкости $\nu_t = \mu_t/\rho$; s - направление вдоль свободной поверхности воды. Уравнения (4) и (6) следует дополнить начальными и граничными условиями, а также некоторыми другими уравнениями (энергии, состояния и др.) в зависимости от конкретной задачи.

Следует подчеркнуть, что в системах уравнений (4) и (6) обведены полуэмпирические вклады турбулентности, аппроксимируемые в рамках гипотезы Буссинеска. Для вычисления величины турбулентной вязкости μ_t или ν_t требуется дополнить системы уравнений соответствующими моделями турбулентности. Причем, универсальная модель турбулентности, подходящая для всех типов течений, в настоящее время отсутствует.

Во **второй главе** рассматривается высокоскоростное течение сжимаемого газа (воздуха) в вихревой трубе. Схематично течение выглядит следующим образом: подводимый поток сжатого газа закручивается в сопловом вводе (1 на рис. 1), после чего поступает в камеру энергоразделения (2 на рис. 1). Двигаясь вдоль стенок камеры энергоразделения, газ формирует винтовое течение на околосвуковых скоростях. Вблизи развихрителя горячего потока (4 на рис. 1) часть газа разворачивается и формирует обратное винтовое течение в приосевой части камеры энергоразделения (т.н. разделительная вихревая труба). В качестве альтернативы, вместо развихрителя может устанавливаться сопло дополнительного потока для ввода газа в приосевую часть камеры энергоразделения (т.н. двухконтурная вихревая труба Ш.А. Пиралишвили).

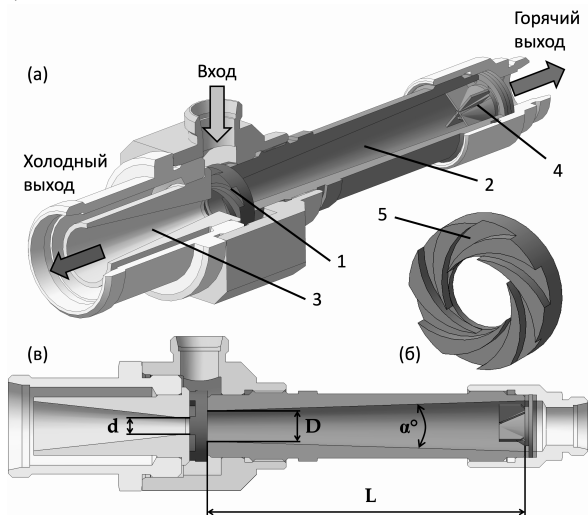


Рис. 1: Схема и основные размеры вихревой трубы: 1 - сопловой ввод; 2 - камера энергоразделения; 3 - диффузор холодного потока; 4 - развихритель горячего потока с дроссельными отверстиями; 5 - сопловой сужающийся канал.

процесса охлаждения газа характеризуется изэнтропным η_s или холодильным КПД η_c , которые задаются выражениями (7).

Турбулентный тепло- и массообмен между двумя основными винтовыми течениями газа приводит к нагреву внешнего течения и соответствующему охлаждению приосевого. Этот процесс носит название эффекта энергоразделения Ранка-Хилша. Для описания процесса вводятся несколько интегральных характеристик вихревой трубы (рис. 1): $\varphi_c = G_c/G_{in}$ - доля холодного потока; $\varphi_h = G_h/G_{in}$ - доля горячего потока; G_{in} , G_c , G_h - массовые расходы входного, холодного и горячего потоков, соответственно; $\Delta T_c = T_{in} - T_c$ - степень понижения температуры. Эффективность про-

$$\eta_s = \frac{h_{in}^* - h_c^*}{h_{in}^* - h_{id}^*} = \frac{T_{in}^* - T_c^*}{T_{in}^* \left(1 - \left(\frac{p_c^*}{p_{in}^*} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} ; \quad \eta_c = \varphi_c \times \eta_s \quad (7)$$

где h_{in}^* , h_c^* - энтальпии торможения входного и холодного потоков газа, соответственно; h_{id}^* - энтальпия торможения газа в конце идеального адиабатического расширения от давления торможения входного потока p_{in}^* до давления торможения холодного потока p_c^* . Вторая форма выражения для η_s получена при помощи уравнения совершенного газа Менделеева-Клапейрона (8); $\gamma = c_p/c_v$ - показатель адиабаты.

Вихревые трубы находят применение в нефтегазодобывающей и других отраслях промышленности. Благодаря своим положительным качествам, таким как отсутствие хладагентов (безопасность), простота и дешевизна, высокая надежность и др., область применения вихревых труб расширяется. Ограничивающим фактором здесь является низкая энергоэффективность данных устройств, характеризуемая уровнем изоэнтропного КПД (в режиме наибольшей холодопроизводительности) порядка $\eta_s \sim 0.3...0.36$, что соответствует холодильному КПД порядка $\eta_c \sim 0.20 - 0.22$. Несмотря на значительные усилия отечественных и зарубежных исследователей, до сих пор не найден путь заметного повышения КПД устройств.

Можно предположить, что основная сложность усовершенствования конструкции и рабочего процесса вихревых труб заключается в отсутствии полного понимания физических процессов, происходящих в камере энергоразделения и вызывающих эффект Ранка-Хилша. Физические процессы непосредственно связаны с турбулентным тепло- и массообменом, точное описание которого невозможно, как было показано в главе 1. Вплоть до настоящего времени эффект Ранка-Хилша остается загадкой и является предметом дискуссий, формулируемых в виде гипотез. Причем, среди всех гипотез, наиболее полной является "гипотеза взаимодействия вихрей" А.П. Меркулова.

Для математического моделирования течения газа в вихревой трубе, систему (4) следует дополнить уравнениями состояния газа и баланса энергии:

$$p = \rho \Re T \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) E = q - (V \cdot \nabla) p + Q_\tau \quad (9)$$

где $E = e + |V|^2/2$ - полная внутренняя энергия газа; $e = c_v T$ - внутренняя энергия газа; $\Re = c_p - c_v$ - газовая постоянная. В рамках настоящего исследования, диссипативной функцией Q_τ , отражающей нагрев газа в результате вязкого трения, можно пренебречь. Аналогично уравнениям Рейнольдса (4), требуется эмпирическая аппроксимация сложных тепло- и массообменных процессов, связанных с турбулентностью. Для этого, в уравнение вводится полуэмпирическая величина q , обозначающая как молекулярные, так и турбулентные потоки энергии.

Дополняя гипотезу Буссинеска “теорией пути смешения Прандтля” можно записать формулировки для тепловых потоков q , используемые в современных моделях турбулентности:

$$q_\sigma = \nabla \cdot \left((\mu + \mu_t) \left(\nabla V + (\nabla V)^T - I \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \cdot V \right) \quad (10)$$

$$q_\lambda = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda + \lambda_t}{c_p} \nabla e \right) \quad (11)$$

где $\lambda_t = c_p \mu_t / Pr_t$ - эмпирический коэффициент турбулентной теплопроводности, определяемый величиной турбулентной вязкости μ_t . Pr_t - турбулентное число Прандтля, величина которого определяется калибровкой модели турбулентности и обычно выбирается из диапазона $Pr_t \in [0.7, 0.9]$. Полуэмпирический тепловой поток q_σ описывает теплоперенос за счет механической работы одного слоя газа над другим, в то время как q_λ аппроксимирует конвективное турбулентное перемешивание газа.

Очевидно, что стандартная аппроксимация потоков энергии q (10) и (11) не учитывает эффект “микрохолодильных циклов”, являющийся частью “гипотезы взаимодействия вихрей” и формулируемый следующей цитатой из классической литературы (Меркулов, 1969; Хинце, 1963; Лойцянский, 2003): «При перемещении элемента газа за счет радиальной турбулентной пульсации скорости ... он адиабатно расширится или сожмется, соответственно изменив свою температуру. Если после этого его температура окажется отличной от температуры расположенных на этом радиусе других элементов, то в результате перемещения произойдет нагрев или охлаждение газа в этом слое».

Для учета эффекта “микрохолодильных циклов” требуется использование “модифицированной теории пути смешения Прандтля”, предложенной Ван Де-емтером (1952), Дайслером и Перлмуттером (1960) и Меркуловым (1969). Несмотря на то, что предпосылки для предлагаемой модификации модели турбулентных течений сжимаемого газа в вихревой трубе появились несколько десятилетий назад, современные модели турбулентности не учитывают эффект “микрохолодильных циклов”. Это можно объяснить тем, что поправка Ван Де-емтера не играет существенной роли для большинства типов течений. Однако она имеет решающее значение для описания эффекта Ранка-Хилша.

Рассматривается адиабатное сжатие и расширение “турбулентного моля” (Ван Де-емтер, 1952; Меркулов, 1969; Лойцянский, 2003) в процессе его конвективного хаотического движения. Раскладывая уравнение адиабаты в ряд Тейлора в окрестности $dp \rightarrow 0$ ($p = p_0 + dp$), можно записать:

$$T = T_0 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T_0}{p_0} dp - \frac{\gamma - 1}{2\gamma^2} \frac{T_0}{p_0^2} dp^2 + \frac{\gamma^2 - 1}{6\gamma^3} \frac{T_0}{p_0^3} dp^3 - \frac{(\gamma^2 - 1)(2\gamma + 1)}{24\gamma^4} \frac{T_0}{p_0^4} dp^4 + \mathcal{O}(dp^5)$$

Данное выражение показывает изменение температуры “турбулентного моля” на $(T - T_0)$ при его перемещении в область давления, отличающегося на величину dp . Оставляя три первых слагаемых, можно записать выражение для

полуэмпирического турбулентного потока тепловой энергии за счет “микрородильных циклов”:

$$q_\gamma = c_\gamma \nabla \cdot \left(\lambda_t \frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{T}{p} \nabla p \right) \quad (12)$$

Здесь c_γ - новая эмпирическая постоянная, которую требуется определить в результате калибровки модели турбулентности.

Для замыкания модели турбулентности требуется найти распределение турбулентной вязкости μ_t по всей проточной части вихревой трубы. В связи с высокими числами Рейнольдса для течения газа в вихревой трубе ($Re \sim 10^6$), в рамках настоящего исследования используется высокорейнольдсовая модель турбулентности k - ε :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) k = \mu_t \operatorname{dev} (\nabla V + (\nabla V)^T) : (\nabla V)^T + \\ + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot V) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) \varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \operatorname{dev} (\nabla V + (\nabla V)^T) : (\nabla V)^T + \\ + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon (\nabla \cdot V) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mu_t = \begin{cases} \frac{\mu \kappa y^+}{\ln(Ey^+)}, & \text{для пограничного слоя: } 30 \leq y^+ \leq 300 \\ C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, & \text{для всей остальной области: } y^+ > 300 \end{cases}$$

$$\lambda_t = c_p \frac{\mu_t}{Pr_t}; \quad y^+ = C_\mu^{\frac{1}{4}} \rho \frac{\sqrt{k}}{\mu} y$$

В том случае, если q_γ берется равным нулю в (9), модель турбулентности сводится к стандартной k - ε -std. В противном случае, учет влияния q_γ в уравнении (9) дает модифицированную модель турбулентности на базе гипотезы Буссинеска, модифицированной теории пути смешения Прандтля и поправки Ван Деамтера: k - ε -VD.

В **третьей главе** рассматриваются турбулентные течения в гидроволновом лотке, вызванные распространением поверхностных волн, сгенерированных волнопродуктором. Отсутствие точных методов расчета требует выполнения большого объема лабораторных исследований для верификации результатов инженерных изысканий. Подобные задачи решаются в различных научных организациях России: Крыловский государственный научный центр (см. рис. 2); Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт; 26 Центральный научно-исследовательский институт; и др.

Расчет и численное моделирование подобных течений играет важную роль при проектировании инженерных сооружений. Круг проблем включает в себя проектирование судов, стационарных и плавучих платформ, плавучих газовых хранилищ, объектов прибрежной инфраструктуры, объектов береговой защиты и других инженерных сооружений. К основным вопросам относится (а) определение силового воздействия от наката волн на погруженный в воду объект; (б) определение других параметров взаимодействия волн с погруженным объектом; (в) проверка результатов расчетов при инженерном сопровождении проектов; (г) исследование и объяснение значимых физических явлений.

Особенно остро стоит задача высокоточной генерации требуемой формы поверхностной волны при помощи программно-управляемого гидравлического аппарата возвратно-поступательного действия - т.н. волнопродуктора. Невозможность точного аналитического решения нелинейных уравнений (6) приводит к тому, что высокоточная генерация нелинейной волны остается недостижимой вплоть до настоящего времени. А это, в свою очередь, может вызывать недопустимо большие ошибки лабораторных испытаний на определение силовых нагрузок на инженерные объекты от наката волн. Требуется разработка принципиально новых алгоритмов автоматизированного управления механическим, пневматическим или гидравлическим приводом волнопродуктора с целью повышения точности генерации поверхностных волновых пакетов сложной формы.

Для этого в диссертации разработана численная модель гидроволнового лотка с волнопродуктором, схема которой показана на рис. 3. Лоток состоит из двух жестко сопряженных моделей течения жидкости: (а) модели двухфазного течения на базе уравнений (4) и метода Volume-of-Fluid (VOF), реализованного в рамках открытого пакета OpenFOAM (решатель *bemInterFoam*); (б) модели квазипотенциального течения (6) на базе метода граничных элементов (Boundary Element Method - BEM). Кроме того, численный гидроволновой лоток включает в себя поршневой или шарнирно закрепленный волнопродуктор.

Двухфазная модель течения VOF является более точной, но вычислительно чрезвычайно затратной. Поэтому, ее использование возможно только в непосредственной близости от исследуемого объекта (например, волнопродуктора). При этом, основная часть расчетного домена (несколько десятков метров) накрывается упрощенной моделью квазипотенциального течения BEM. В рамках последнего подхода, турбулизация течения в результате обрушения гребней волн учитывается при помощи эмпирической модели турбулентной вязкости, построенной на основе гипотезы Буссинеска; см. уравнения (6).

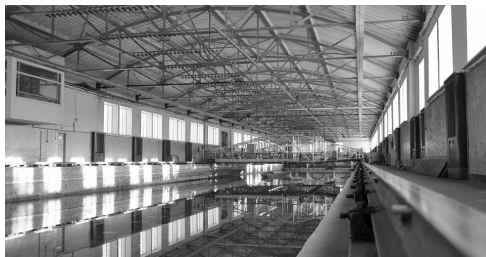


Рис. 2: Бассейн Крыловского государственного научного центра (<https://krylov-centre.ru/experimental>).

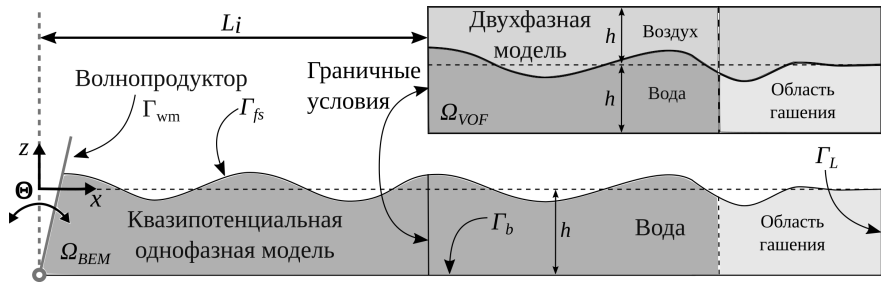


Рис. 3: Схема численной модели гидроволнового лотка.

Для эмпирической параметризации величины турбулентной вязкости ν_t , в диссертации использована алгебраическая модель турбулентности:

$$\nu_t = \chi \frac{H_{br} L_{br}}{T_{br}}, \quad (15)$$

где H_{br} , L_{br} и T_{br} - вертикальный, горизонтальный и временной масштабы процесса обрушения гребня волны; $\chi = 0.02$ является безразмерной эмпирической постоянной калибровки. Особенность задачи состоит в том, что порождение турбулентности происходит порционно в моменты обрушения волн в координатах x_{br} . Вычисленная по зависимости (15) величина ν_t распространяется на пространственную область длиной L_{br} начиная с координаты x_{br} .

Важно подчеркнуть, что физические причины обрушения волн до конца не понятны. Это приводит к проблемам формулирования точного и надежного критерия обрушения, который служит для нахождения координаты начала обрушения гребня x_{br} .

Четвертая глава посвящена калибровке, валидации и исследованию модифицированной k - ε -VD модели турбулентности для течения газа в вихревой трубе. Дополнительно исследовался широкий диапазон других типов стандартных моделей турбулентности (обозначенных как -std). Вычисления с использованием стандартных моделей турбулентности выполнены в коммерческом пакете ANSYS CFX, в то время как k - ε -VD модель турбулентности реализована в глубоко модифицированном решателе vtRhoCentralFoam с использованием свободного конечно-объемного гидродинамического пакета OpenFOAM. В обоих случаях, вычисления выполнялись в параллельном режиме с использованием библиотек OpenMP и MPI.

Численное моделирование течения газа в вихревых трубах разного типа при помощи стандартных моделей “-std” показало, что расчетные интегральные характеристики вихревых труб существенно отличаются от экспериментальных измерений. Так, в таблицу 1 сведены результаты моделирования двухконтурной вихревой трубы Ш.А. Пиралишвили при помощи широкого диапазона стандартных моделей турбулентности. Видно, что расчетная величина максимума изоэнтропного КПД η_s (7) занижена по сравнению с лабораторными измерениями более чем на 30%. Причем, тяжеловесные модели крупных вихрей LES-std на очень мелкой расчетной сетке показывают более высокие показатели η_s , в то время как погрешность модели k - ε -std превышает 60%. Следует подчеркнуть,

Таблица 1: Параметры моделей двухконтурной вихревой трубы и результаты моделирования.

№	Количество ячеек	Модель турбулентности	$\eta_{s,max}$	φ_c при $\eta_{s,max}$
Эксперимент Ш.А. Пиралишвили			0.37	1.2
1	11 000	$k-\varepsilon$ -std	0.0956	0.96
2	44 000	$k-\varepsilon$ -std	0.0116	0.89
3	92 000	$k-\varepsilon$ -std	0.133	0.93
4	175 000	$k-\varepsilon$ -std	0.138	0.93
5	271 000	$k-\varepsilon$ -std	0.139	0.93
6	823 000	$k-\varepsilon$ -std	0.139	0.93
7	271 000	$k-\varepsilon$ -RNG-std	0.125	1.12
8	11 000	SAS-SST-std	0.05	1.20
9	44 000	SAS-SST-std	0.08	1.35
10	92 000	SAS-SST-std	0.095	1.40
11	175 000	SAS-SST-std	0.13	1.20
12	271 000	SAS-SST-std	0.17	1.20
13	823 000	SAS-SST-std	0.17	1.60
14	823 000	LES-std		
15	2 771 000	LES-std	0.28	1.60
16	8 069 000	LES-std		
17	92 000	RSM-LRR-std	0.173	1.50
18	175 000	RSM-LRR-std	0.231	1.48
19	271 000	RSM-LRR-std	0.260	1.52
20	823 000	RSM-LRR-std	0.260	1.40

что использование моделей крупных вихрей LES-std возможно только на высокопроизводительных системах, а типичное время расчета превышает 10 дней (более 30 дней для модели №16). Это говорит о невозможности использования подобных подходов в инженерных изысканиях.

Таблица 2: Исследуемые разделительные вихревые трубы, см. рис. 1.

№	D , мм	d , мм	L , мм	α (°)	Эксперимент
1	16.8	9.8	168.0	3.5	Khait et al., 2014
2	10.1	4.5	100.0	4.0	Kun Chang et al., 2011
3	11.0	5.0	106.0	4.0	Skye et al., 2006

Для повышения точности моделирования течения газа в вихревой трубе требуется, прежде всего, определить величину эмпирической постоянной c_γ в уравнениях модели $k-\varepsilon$ -VD (12). Для этого было выполнено несколько серий вычислительных экспериментов для разделительных вихревых труб различных размеров, в соответствии с табл. 2. Экспериментальные данные для исследуемых вихревых труб № 1, 2 и 3 были получены соискателем лично или заимствованы из литературы. Величина коэффициента c_γ варьировалась в диапазоне $0 \leq c_\gamma \leq 1.4$. Во всех расчетах доля холодного потока вихревой трубы была зафиксирована равной $\varphi_c = 0.6$. Для данного режима, экспериментально изме-

ренные величины изэнтропного КПД для вихревых труб №1 и №2 составляют $\eta_s = 0.374$ и $\eta_s = 0.342$, соответственно.

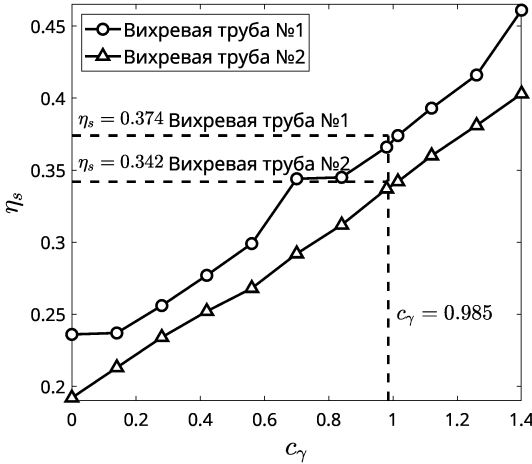


Рис. 4: Зависимость расчетного изэнтропного КПД η_s от величины коэффициента c_γ , построенная для вихревых труб №1 и №2.

калибровки k - ϵ -VD модели турбулентности. Из графика видно, что величина постоянной $c_\gamma \approx 0.985$ дает наилучшее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными для доли холодного потока $\varphi_c = 0.6$. Полученное значение очень близко к асимптотической оценке.

Асимптотическую оценку величины постоянной c_γ можно сделать по следующей формуле:

$$c_\gamma \sim 1 - \frac{\sqrt[3]{\Omega} |\nabla p|}{2\gamma p} \quad (16)$$

Принимая во внимание оценки характерного размера ячеек расчетной сетки $\sqrt[3]{\Omega} \sim 2 \times 10^{-4}$ м, максимального градиента давления $|\nabla p| \sim 5 \times 10^7$ Па/м, соответствующего статическому давлению $p \sim 3 \times 10^5$ Па, можно оценить величину коэффициента как $c_\gamma \approx 0.988$. Для проверки данной оценки, на рис. 4 показаны результаты

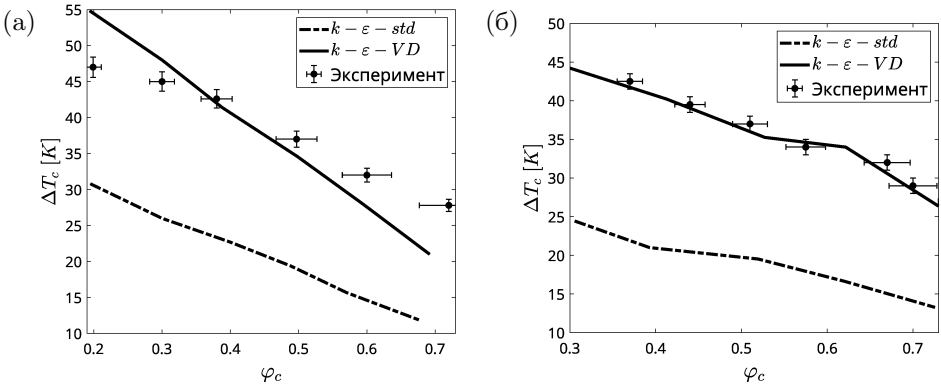


Рис. 5: Зависимость степени понижения температуры ΔT_c от доли холодного потока φ_c для вихревых труб (а) №2 и (б) №3.

Для более детальной оценки точности k - ϵ -VD модели турбулентности по сравнению со стандартной k - ϵ -std моделью, а также с экспериментальными измерениями, была выполнена серия численных расчетов течения газа в вихревых трубах №1, 2 и 3 при переменной доле холодного потока в диапазоне

$0.2 \leq \varphi_c \leq 0.7$. Вычисленные и экспериментальные графики степени понижения температуры $\Delta T_c = T_{in} - T_c$ в зависимости от доли холодного потока φ_c приведены на рис. 5. Видно, что как и в случае с двухконтурной вихревой трубой, стандартная модель турбулентности $k-\varepsilon$ -std дает ошибку в оценке эффекта Ранка-Хилша более 30% по сравнению с экспериментальными измерениями. С другой стороны, использование усовершенствованной модели $k-\varepsilon$ -VD значительно сокращает ошибку оценки эффекта энергоразделения до 2...10%.

Пятая глава посвящена усовершенствованию геометрии и рабочих процессов вихревых труб Ранка-Хилша при помощи численных расчетов на основе модифицированной модели турбулентности $k-\varepsilon$ -VD, а также при помощи экспериментальных исследований и испытаний натурных образцов вихревых труб. Выбраны два направления исследования: (а) параметрическое исследование размеров и эксплуатационных параметров вихревой трубы, а также (б) усовершенствование отдельных узлов вихревой трубы.

В рамках первого направления, был проведен анализ результатов численного моделирования течения газа в двухконтурной вихревой трубе пользуясь методом минимизации порождения энтропии. Полученное трехмерное распределение полей порождения энтропии показало существование паразитной зоны в центральной части камеры энергоразделения, которая не участвует в эффекте Ранка-Хилша или вносит в него отрицательный вклад. Исходя из этого, было сделано предположение о необходимости уменьшения диаметра камеры энергоразделения D , диаметров диафрагмы d_a и сопла ввода дополнительного потока d_b . Размеры обозначены на рис. 1.



Рис. 6: Экспериментальный образец двухконтурной вихревой трубы.

На основании построенного плана эксперимента, был выполнен параметрический анализ влияния факторов на характеристики вихревой трубы, работающей в двухконтурном и разделительном режимах. Для этого был создан экспериментальный стенд для исследования работы двухконтурной вихревой трубы с изменяемой геометрией, показанной на рис. 6. Особенностью созданного стенда является применение оригинальных расходомеров типа трубы Вентури и автоматизированной системы сбора и обработки данных, оценивающей интегральные характеристики вихревой трубы и неопределенность измерений.

Результаты вычислительных и лабораторных экспериментов подтвердили начальную гипотезу о необходимости уменьшения диаметров D , d_a и d_b для исключения паразитной области течения. Исследование показало целесообразность выбора следующих размеров: $D = 25...27$ мм, $d_a = d_b = 18...19$ мм (исходные размеры $D = 30$ мм и $d_a = d_b = 21$ мм). При этом, длина камеры энергоразделения и угол ее конусности должны лежать в следующих пределах:

$L = 3D \dots 6D$ и $\alpha = 0^\circ \dots 4^\circ$. Выполнение указанных рекомендаций позволило повысить холодильный КПД η_c вихревой трубы на 2...3%.

В рамках второго направления исследований был разработан и запатентован принципиально новый тип соплового ввода вихревой трубы, предназначенный для эффективного формирования сверхзвукового закрученного течения газа. Новый тип соплового ввода повышает эффективность перевода большого запаса потенциальной энергии давления газа (при больших степенях расширения $p_{in}/p_c \geq 8$) в кинетическую энергию потока, используемую в эффекте энерго-разделения.

Принципиальная схема двухконтурной вихревой трубы с установленным сверхзвуковым сопловым вводом нового типа показана на рис. 7. В отличие от дозвукового классического соплового ввода, принцип действия нового соплового ввода заключается в следующем: проходя по сужающимся межлопаточным каналам газовый поток остается в дозвуковом режиме течения. Далее он попадает во входное сечение Γ_{in} новой сверхзвуковой части, в которой происходит ускорение до звуковой скорости в критическом сечении Γ_a . За этим сечением имеется расширяющаяся часть канала (аналогично соплу Лавалья), проходя по которой газовый поток разгоняется до сверхзвуковых скоростей на выходе в сечении Γ_{out} . Предложенный сопловый ввод отличается от сопла Лавалья наличием тангенциальной компоненты скорости V_τ дополнительно к продольной компоненте V_ξ . Таким образом, ускорение газа происходит не только за счет варьирования площадью проходного сечения Γ , но и за счет уменьшения радиуса вращения свободного вихря.

Для предварительного инженерного расчета течения газа с целью выбора размеров сверхзвукового соплового ввода была разработана квазиодномерная газодинамическая модель на базе уравнений неразрывности, Бернулли, сохранения энергии, а также уравнения адиабаты. Результаты предварительного расчета были верифицированы при помощи модели трехмерного течения газа в вихревой трубе. Полученное распределение числа Маха в проточной части двухконтурной вихревой трубы с установленным сверхзвуковым сопловым вводом показано на рис. 8(а). Видно, что сверхзвуковой режим течения газа $Ma > 1$ сохраняется на длине $L_s \approx 0.55D$. Данное расстояние примерно на 40% выше по сравнению со случаем использования классического дозвукового шестизаходного соплового ввода. Таким образом обеспечивается поле высоких окружающих

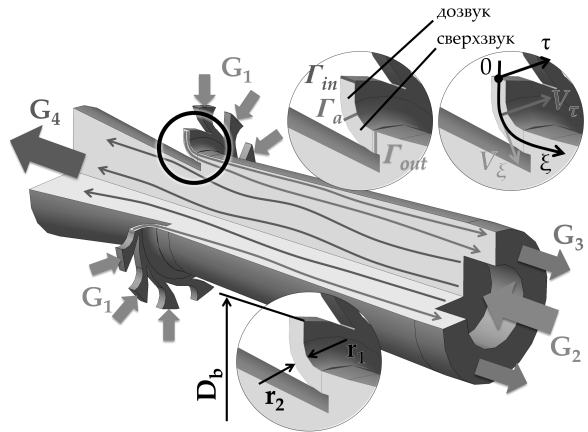


Рис. 7: Двухконтурная вихревая труба со сверхзвуковым сопловым вводом нового типа.

скоростей на большей протяженности камеры энергоразделения, что приводит к более интенсивному энергообмену q_σ , q_λ и q_γ , см. уравнения (10)–(12). Фотография экспериментального образца соплового ввода нового типа показана на рис. 8(б).

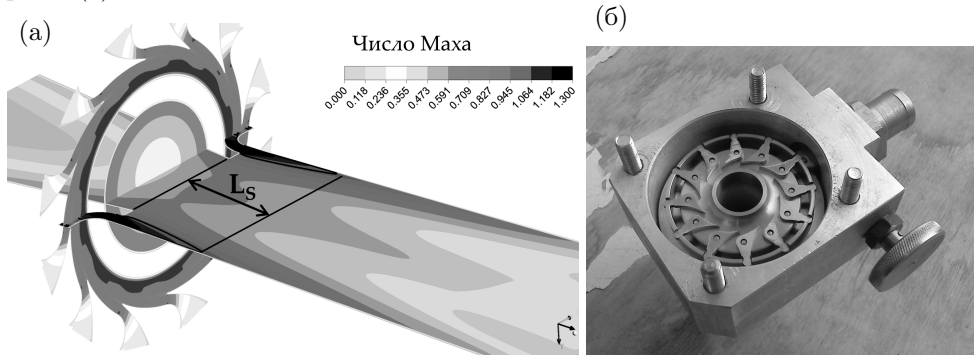


Рис. 8: (а) Распределение числа $Ma = |V|/a$ в проточной части двухкантовой вихревой трубы со сверхзвуковым сопловым вводом; a - локальная скорость звука. (б) Фотография экспериментального образца соплового ввода нового типа.

На рис. 9 сравниваются интегральные характеристики $\eta_c(\varphi_c)$ двухкантовой вихревой трубы с установленным сверхзвуковым и дозвуковым сопловыми вводами. График показывает, что даже на небольших перепадах давления порядка $\Delta p \approx 400$ кПа установка правильно рассчитанного соплового ввода нового типа дает увеличение холодильного КПД.

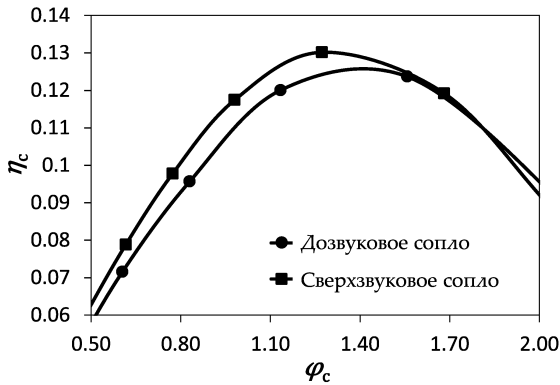


Рис. 9: Холодильный КПД η_c двухкантовой вихревой трубы с применением различных сопловых вводов.



Рис. 10: Распределение числа $Ma = |V|/a$ в проточной части двухкантовой вихревой трубы при возникновении эффекта дестабилизации течения.

Исследования с применением разработанных численных моделей позволили впервые обнаружить физический эффект дестабилизации течения в вихревой трубе вследствие неверного выбора геометрических размеров соплового ввода нового типа. В качестве примера, рис. 10 демонстрирует эффект дестабилизации течения при увеличении диаметра расположения лопаток с 37 мм до 42 мм.

Дестабилизация течения сопровождается резким падением характеристик вихревой трубы. Следует избегать появления обнаруженного эффекта.

В диссертации предложен новый способ торможения холодного потока вихревой трубы путем установки спрямляющего лопаточного аппарата (развихрителя) перед диффузором холодного потока (непосредственно за сечением диафрагмы). Целью применения развихрителя холодного потока является исключение тангенциальной компоненты скорости течения перед его торможением в диффузоре холодного потока, что должно сократить потери энергии на преодоление гидравлического сопротивления диффузора и, соответственно, повысить эффективность вихревой трубы. Исследованы три типа развихрителя, показанные на рис. 11. Особенное внимание было уделено развихрителю №3, в котором центральная часть течения пропускается мимо спрямляющего аппарата учитывая то, что вращение газа в приосевой зоне практически отсутствует.

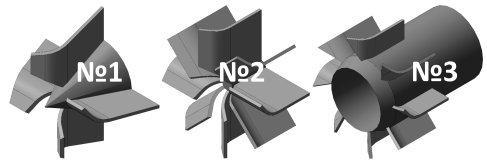


Рис. 11: Схема развихрителя холодного потока.



Рис. 12: Фотография промышленного образца вихревой трубы РЕСШ.4414.

Исследования показали, что несмотря на изначальные ожидания, развихритель №3 приводит к дестабилизации течения и формированию вторичных вихревых структур. Это, в свою очередь, приводит к росту потерь энергии. С другой стороны, наиболее эффективным спрямляющим аппаратом оказался развихритель №2. Его установка привела к росту холодильного КПД.

Реализация всех разработанных усовершенствований вихревой трубы и ее отдельных узлов в промышленных образцах (см. рис. 12) показала

рост изэнтропного КПД в режиме наибольшей холодопроизводительности ($\varphi_c = 0.6$) на 4...5%, до величины $\eta_s \approx 0.4...0.41$.

Шестая глава посвящена разработке точного и надежного критерия обрушения волн, служащего для нахождения координаты начала обрушения гребня x_{br} . Критерий обрушения является составной частью модели турбулентной вязкости (15), как подробно обсуждается в главе 3.

В диссертации выдвинута гипотеза о том, что обрушение волны происходит в тот момент, когда лагранжева скорость жидкой частицы V_{fl} на гребне волны превышает скорость самого гребня V_{cr} . Для измерения указанных скоростей был предложен новый метод экспериментального исследования, который заключается в точном измерении мгновенных координат волнопродуктора X , его мгновенных скоростей $\dot{X}$ и ускорений $\ddot{X}$ (см. рис. 15). Далее эти данные

использовались в математической модели течения жидкости для точного воспроизведения движения волнопродуктора. В результате осуществлялась синхронизация лабораторного и численного волнопродукторов, которая позволила дополнить измерения скорости V_{cr} (при помощи высокоскоростной съемки) смоделированными оценками скорости V_{fl} , экспериментальное измерение которой затруднено или невозможно. Фотография используемого лабораторного гидроволнового лотка показана на рис. 13.

Выполненные исследования позволили доказать верность начальной гипотезы, что привело к следующей формулировке кинематического критерия обрушения волн:

$$\frac{V_{fl}}{V_{cr}} \geq (B_x \approx 1) \quad (17)$$

где B_x - эмпирическая постоянная, найденная в процессе экспериментальной калибровки модели (см. рис. 13).

Выполнено детальное исследование усовершенствованной модели турбулентной вязкости на базе кинематического критерия обрушения (17). Для этого, результаты численного моделирования распространения волновых пакетов при помощи точной модели VOF сравнивались с результатами модели квазипотенциального течения BEM, замкнутой моделью турбулентной вязкости (15) и (17). Волновые пакеты отличались друг от друга высотой волн, характеризуемой параметром крутизны $k_0\zeta_0$.



Рис. 13: Фотография лабораторной установки Тель-Авивского университета (Израиль).

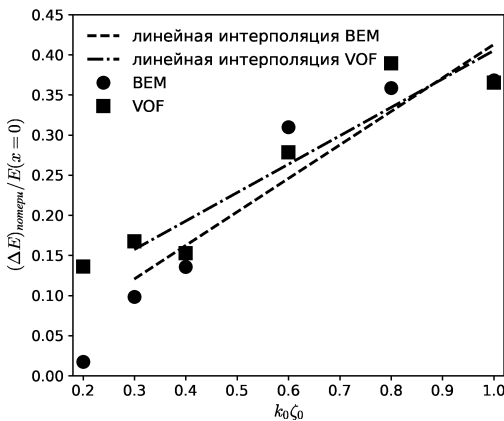


Рис. 14: Диссипация энергии волнового пакета в турбулентность $(\Delta E)_{потери}$ по отношению к начальному запасу энергии $E(x=0)$.

Процесс диссипации энергии волнового пакета в турбулентность, характеризуемый полными потерями энергии $(\Delta E)_{потери}$ по отношению к начальному запасу энергии $E(x=0)$, показан на рис. 14. Видно, что результаты модели BEM очень хорошо соответствуют точной модели VOF, что говорит о верности кинематического критерия обрушения волн (17). Более того, погрешность и неопределенность найденных координат x_{br} начала обрушения волны не превышала 0.15...0.55% от длины гидроволнового лотка.

На основании анализа турбулентных течений, порожденных обрушением волн, впервые обнаружен физический эффект “фазовой синхронизации” (phase locking effect). Разработан оригинальный способ учета данного эффекта в модели квазипотенциального течения (6) путем введения полуэмпирической средней по глубине скорости $\tilde{V}$.

В **седьмой главе** разрабатываются новые алгоритмы управления волнопродукторами для численных и лабораторных гидроволновых лотков. Кинематическая схема исследуемого волнопродуктора показана на рис. 15. Задача состоит в том, чтобы найти такой закон возвратно-поступательного движения волнопродуктора $X(t) = \sum_j \hat{X}_j \cos(\omega_j t + \phi_j)$ (см. рис. 15), который приведет к высокоточной генерации волнового пакета, заданного функцией $\eta(x, t) = \sum_j \hat{A}_j^{(1)} \cos(k_j x - \omega_j t)$, где $\omega_j = 2\pi/T_j$, $k_j = 2\pi/\lambda_j$ и ϕ_j - круговая частота, волновое число и начальная фаза, соответственно. Индекс j в выражениях указывает на номер гармоники в частотном спектре волнового пакета. Символ $\hat{}$ указывает на амплитуду выделенной гармоники спектра.

Поиск закона $X(t)$ осуществляется при помощи нелинейного граничного условия на волнопродукторе:

$$\left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} X(t) \frac{df}{dz} - \frac{dX}{dt} f \right) \Big|_{x=X(t)} = 0 \quad (18)$$

Здесь $f(z) = 1 + z/(h+l)$ - функция формы, задающая все возможные типы волнопродукторов через выбор величина l ; h - глубина воды. В граничное условие (18) входит мгновенное поле скорости в непосредственной близости от волнопродуктора, заданное гидродинамическим потенциалом $\varphi(x, z, t)$ (5).

Существующие теории волнопродукторов ограничены 1-м или максимум 2-м порядком нелинейности при определении поля $\varphi(x, z, t)$. Можно предположить, что возникающая погрешность в форме свободной поверхности (в некоторых случаях превосходящая 15%) связана с данным ограничением. В диссертации предложены новые более точные методы определения φ и, соответственно, $X(t)$, опирающиеся на решение нелинейных уравнений Захарова и Шредингера для поверхностных волн на воде. Новый подход позволил впервые учесть вклады 3-го или даже более высокого порядка нелинейности в выражениях для φ и $X(t)$.

Выражение для гидродинамического потенциала с порядком нелинейности p в рамках теории Захарова запишется:

$$\varphi^{(p)}(x, z, t) = \text{Re} \left\{ -i B^{(p)} \kappa^{(p)} \cosh \left(\kappa^{(p)} (h + z) \right) e^{i(\kappa^{(p)} x - \omega^{(p)} t)} \right\}, \quad (19)$$

где $\kappa^{(p)}$ - функция p -го порядка, заданная аналитически, а $B^{(p)}$ - комплексные амплитуды свободных и связанных волн, определяемые теорией Захарова:

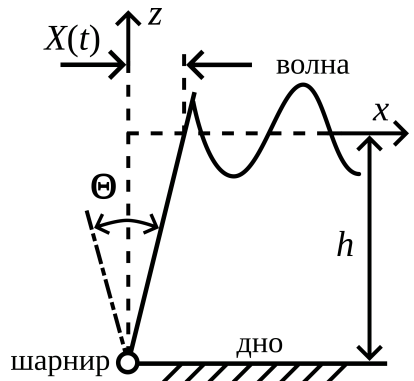


Рис. 15: Схема волнопродуктора.

$$B^{(2)} = - \iint_{-\infty}^{+\infty} \left\{ V_{0,1,2}^{<1>} B_1^{(1)} B_2^{(1)} \delta_0^{12} \frac{e^{i\Delta_0^{12}t}}{\Delta_0^{12}} + V_{0,1,2}^{<2>} B_1^{(1)*} B_2^{(1)} \delta_{01}^2 \frac{e^{i\Delta_{01}^2t}}{\Delta_{01}^2} + \right. \\ \left. V_{0,1,2}^{<3>} B_1^{(1)*} B_2^{(1)*} \delta_{012} \frac{e^{i\Delta_{012}t}}{\Delta_{012}} \right\} d\kappa_1 d\kappa_2 \quad (20)$$

$$B^{(3)} = - \iiint_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \tilde{T}_{0,1,2,3}^{<1>} B_1^{(1)} B_2^{(1)} B_3^{(1)} \delta_0^{123} \frac{e^{i\Delta_0^{123}t}}{\Delta_0^{123}} + \right. \\ \left(\tilde{T}_{0,1,2,3}^{<2>} - T_{0,1,2,3}^{<2>} \right) B_1^{(1)*} B_2^{(1)} B_3^{(1)} \delta_{01}^{23} \frac{e^{i\Delta_{01}^{23}t}}{\Delta_{01}^{23}} + \tilde{T}_{0,1,2,3}^{<3>} B_1^{(1)*} B_2^{(1)*} B_3^{(1)} \delta_{012}^3 \frac{e^{i\Delta_{012}^3t}}{\Delta_{012}^3} + \\ \left. \tilde{T}_{0,1,2,3}^{<4>} B_1^{(1)*} B_2^{(1)*} B_3^{(1)*} \delta_{0123} \frac{e^{i\Delta_{0123}t}}{\Delta_{0123}} \right\} d\kappa_1 d\kappa_2 d\kappa_3 \quad (21)$$

При этом, амплитуды 1-го порядка нелинейности $B^{(1)}$ являются наперед заданными и определяющими целевую форму волнового пакета. Величины V , T и $\tilde{T}$ представляют собой ядра теории Захарова и задаются аналитически. Символ $*$ указывает на комплексное сопряжение.

Подстановка выражений (19) в нелинейное граничное условие на волнопродукторе (18) позволяет определить закон движения волнопродуктора:

$$X(t) = \sum_j X_j^{(1)} + \sum_n X_n^{(2)} + \sum_m X_m^{(3)}, \quad (22)$$

где верхний индекс “(1)” обозначает вклады в рамках линеаризованной задачи, а индексы “(2)” и “(3)” обозначают нелинейные поправки 2-го и 3-го порядков нелинейности. Индексы “ j ”, “ n ” и “ m ” обозначают номера гармоник с круговыми частотами ω_j , ω_n и ω_m . Закон движения волнопродуктора на базе решения нелинейного уравнения Шредингера находится следуя аналогичной процедуре.

Разработанные алгоритмы вычисления функции $X(t)$ сформулированы в виде компьютерных программ на языках программирования Matlab, Python и C++. Версия на языке Python зарегистрирована в Роспатенте. Типичный вид вкладов в движение поршневого волнопродуктора, а также их сумма $\sum X$, показаны на рис. 16.

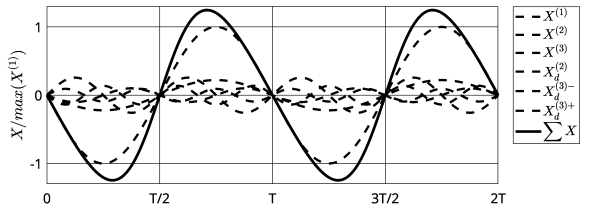


Рис. 16: Координата $X(t)$ волнопродуктора в зависимости от времени, вычисленная методом на базе уравнения Шредингера; T - период регулярной волны.

Проведенные вычислительные и экспериментальные исследования показали, что применение разработанных алгоритмов управления волнопродуктором позволяет повысить точность генерации поверхностных волн, но не исключает погрешность полностью.

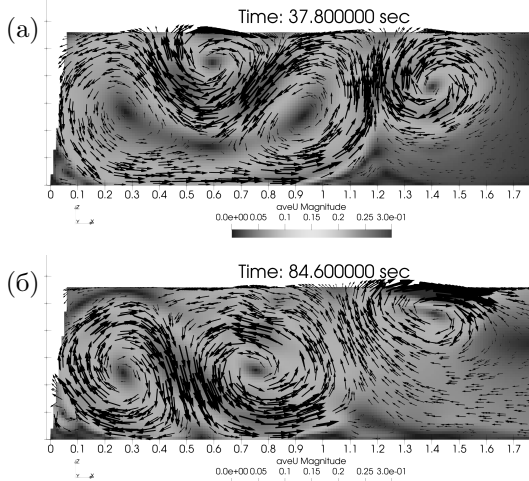


Рис. 17: Вихревые течения $\bar{V}'$ вблизи волнопродуктора при генерации регулярного волнового поля: (a) $t = 37.8$ с, (б) $t = 84.6$ с.

на движения волнопродуктора (22). Из этого следует вывод, что порождение сложных вихревых турбулентных течений вследствие работы волнопродуктора является причиной возникновения ошибки в форме сгенерированной волны. В связи с чрезвычайной сложностью протекающих физических процессов, их учет требует введения эмпирических поправок в слабонелинейные алгоритмы на базе уравнений Захарова и Шредингера.

Предложено ввести эмпирическую корректировку передаточной функции $\Lambda^{(1)}$ в алгоритмах управления волнопродуктором на базе уравнений Захарова и Шредингера $(\hat{X}_j^{(1)} \sim \Lambda_j^{(1)} \hat{A}_j^{(1)})$ через новую эмпирическую функцию β : $\Lambda^{(1)} = \Lambda_{\text{теория}}^{(1)} \times \beta$. Опираясь на преимущества разработанных в главах 3 и 6 математических моделей

сложных вихревых турбулентных течений, разработан оригинальный итерационный метод поиска числовых значений функции β для различных режимов работы волнопродуктора. Серия вычислительных и лабораторных исследований показала, что эмпирическая функция β варьируется в диапазоне $1 \leq \beta \leq 1.15$, таким образом, внося поправку порядка 15% в движение волнопродуктора.

Проведенные численные и экспериментальные исследования показали, что применение разработанных алгоритмов управления волнопродуктором с уче-

Восьмая глава посвящена анализу физики процессов, протекающих в жидкости при работе волнопродуктора. Пользуясь методом осреднения векторного поля скорости, полученного при помощи точной модели двухфазного течения VOF, была выделена вихревая компонента скорости $\bar{V}'$. Вопреки ожиданиям, скорость $\bar{V}'$ в значительной степени оказалась отличной от нуля в непосредственной близости от волнопродуктора. Эволюция во времени поля $\bar{V}'$ (для двух моментов времени) вблизи волнопродуктора показана на рис. 17.

Очевидно, что вихревая компонента течения $\bar{V}'$ не учтена в слабонелинейном поле скорости $\varphi^{(p)}$ (19), использованном для определения зако-

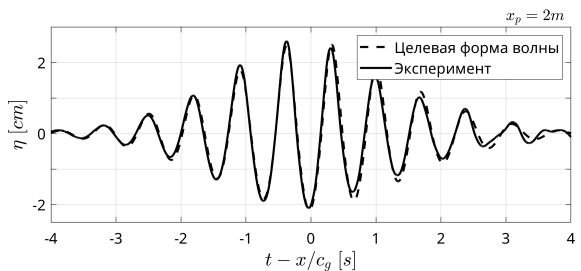


Рис. 18: Нелинейная генерация волнового пакета в гидроволновом лотке Тель-Авивского университета.

том эмпирической поправки β позволяет существенно подавить формирование нежелательных “паразитных волн” и, соответственно, повысить точность генерации волновых пакетов. В качестве примера, на рис. 18 сравнивается фактическая форма поверхностной волны, измеренная лабораторным волномером в координате $x_p = 2$ м гидроволнового лотка, с целевой формой волнового пакета.

Экспериментально подтвержденная остаточная ошибка генерации поверхностных волн, оцениваемая среднеквадратичным отклонением свободной поверхности от целевой формы волны, не превышает 1% для сильнонелинейных волн и 0.5% для слабонелинейных волн. Столь высокая точность стала возможной благодаря комбинации математических моделей и методов, разработанных в настоящей диссертации.

Заключение

1. В диссертации решена научная проблема повышения точности прогнозирования интегральных характеристик гидропневмоаппаратов, имеющая важное хозяйственное значение для развития страны.
 - На основе анализа сложных физических явлений, наблюдаемых в проточных частях вихревых труб и поршневых волнопродукторов, разработаны значительно усовершенствованные математические модели турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа, предназначенные для прогнозирования интегральных характеристик указанных гидропневмоаппаратов. Математические модели учитывают впервые введенный турбулентный поток энергии q_γ , вызванный эффектами сжимаемости жидкости и дополняющий ранее учтенные турбулентные потоки q_σ и q_λ . Модели также учитывают кинематический критерий, который верно отражает физику обрушения волн, что впервые экспериментально доказано в диссертации.
 - Разработаны компьютерные программы для численного решения уравнений математических моделей при помощи современных методов параллельных и распределенных вычислений (OpenMP, MPI), методов конечных объемов (FVM) и граничных элементов (BEM).
 - Выполнена калибровка и верификация модифицированных моделей турбулентных течений по отношению к серии лабораторных измерений. Экспериментально определены величины калибровочных коэффициентов моделей турбулентных течений: $c_\gamma \approx 0.985$ и $B_x \approx 1$.
 - Усовершенствованные модели турбулентных течений показали значительный рост точности прогнозирования интегральных характеристик вихревых труб и поршневых волнопродукторов. Экспериментально подтвержденная погрешность прогноза величины изэнтропного КПД вихревой трубы снижена с $\sim 30\%$ до $\sim 2...10\%$, а погрешность определения пространственной координаты начала обрушения гребня волны, сгенерированной волнопродуктором, снижена до $\sim 0.15...0.55\%$ от длины гидроволнового лотка.

- Разработанные модификации моделей турбулентных течений жидкости и газа были использованы для совершенствования рабочих процессов вихревых труб и поршневых волнопродукторов.
2. На основе разработанных усовершенствованных математических моделей, выполнено детальное теоретическое и экспериментальное исследование течений жидкости и газа в проточных частях вихревых труб и волнопродукторов.
 - Разработан новый экспериментальный метод исследования кинематических характеристик обрушивающихся поверхностных волн, который отличается высокоточной синхронизацией режимов и параметров работы лабораторного и численного волнопродукторов (мгновенных координат, скоростей и ускорений).
 - Экспериментально доказано, что обрушение волн возникает в тот момент, когда лагранжева скорость жидкой частицы на гребне волны превышает скорость самого гребня. Это, в свою очередь, дает надежные основания для применения кинематического критерия обрушения волн для замыкания модели течений жидкости в гидроволновом лотке с волнопродуктором.
 - Показано, что разработанная модель турбулентных течений жидкости и газа хорошо отражает положения гипотезы взаимодействия вихрей А.П. Меркулова. Найдены экспериментальные и численные подтверждения верности гипотезы взаимодействия вихрей.
 3. Используя разработанные математические модели, обнаружены и исследованы новые физические явления, важные для инженерной практики.
 - Применяя метод минимизации порождения энтропии для анализа течения в вихревой трубе, впервые установлено существование паразитной области течения в камере энергоразделения вихревой трубы. Данная область течения отвечает за некоторую часть необратимых потерь энергии, но при этом не вносит полезный вклад в эффект температурного разделения.
 - Впервые обнаружен эффект дестабилизации течения в камере энергоразделения вихревой трубы со сверхзвуковым сопловым вводом нового типа и спрямляющим лопаточным аппаратом холодного потока. Данный эффект приводит к резкому ухудшению энергетических характеристик вихревой трубы и вызван неверно выбранными размерами и режимными параметрами сверхзвукового соплового ввода и спрямляющего аппарата.
 - Впервые обнаружено явление “фазовой синхронизации” (phase locking effect), вызванное влиянием турбулентных течений, порожденных в результате обрушения поверхностных волн. Найден способ эмпирической параметризации эффекта “фазовой синхронизации”.
 - Впервые обнаружено формирование сложных нестационарных вихревых течений вблизи волнопродуктора, вызванных его функционированием.
 4. Проведенные численные и экспериментальные исследования позволили разработать ряд усовершенствований проточной части вихревой трубы.
 - Создан экспериментальный стенд для исследования работы вихревой трубы в двухконтурном и разделительном режимах, который отличается применением

оригинальных расходомеров типа трубы Вентури и автоматизированной системы сбора и обработки данных, оценивающей интегральные характеристики вихревой трубы и неопределенность измерений.

- Серия вычислительных и лабораторных экспериментов позволила определить размеры камеры энергоразделения и режимные параметры работы вихревой трубы, позволяющие уменьшить или полностью исключить паразитную область течения. Установлено, что исключение паразитной области течения приводит к росту КПД вихревой трубы.
5. Применяя полученные математические модели течений жидкости и газа, разработаны усовершенствования отдельных узлов вихревой трубы с целью повышения ее интегральных характеристик.
- Предложен и запатентован принципиально новый тип сверхзвукового соплового ввода вихревой трубы. Новый тип соплового ввода отличается наличием дополнительного сегмента, выполненного в виде аналога сопла Лаваля и расположенного непосредственно за сужающимися межлопаточными каналами.
 - Разработана методика инженерного расчета соплового ввода нового типа, опирающаяся на газодинамические уравнения квазидвумерного движения.
 - Разработан новый способ эффективного торможения высокоскоростного холодного потока вихревой трубы за счет установки спрямляющего лопаточного аппарата (развихрителя) непосредственно перед диффузором холодного потока.
- Реализация разработанных усовершенствований вихревой трубы и ее отдельных узлов в промышленных образцах ВТ 30Р, РЕСШ.4414 и др. вихревых трубах показала рост изоэнтропного КПД в режиме наибольшей холодопроизводительности ($\varphi_c = 0.6$) на $\sim 4...5\%$ (в отдельных случаях до $\sim 7\%$), до величины $\eta_s = 0.4...0.41$. Полученный результат вносит существенный вклад в решение проблемы повышения энергоэффективности вихревых труб, имеющей важное хозяйственное значение для развития страны.
6. Разработаны принципиально новые слабонелинейные алгоритмы автоматизированного управления поршневым и шарнирно закрепленным волнопродуктором на основе нелинейных уравнений Захарова и Шредингера.
- Применение уравнений Захарова и Шредингера в новых алгоритмах управления волнопродуктором взамен стандартных аналитических подходов позволило повысить точность генерации волн за счет впервые учтенных нелинейных поправок 3-го порядка нелинейности.
 - Алгоритмы сформулированы на языках программирования Matlab, Python и C++, зарегистрированы в реестре РФ программ для ЭВМ и имплементированы в системы управления волнопродукторами (в том числе волнопродуктором большого гидроволнового лотка Тель-Авивского университета).
7. Используя разработанные модели турбулентных течений жидкости и газа, выполнено детальное исследование структуры обнаруженных сложных нестационарных вихревых течений, формирующихся вблизи волнопродуктора.

- Установлено, что данные течения являются причиной возникновения погрешности генерации волн волнопродукторами, поскольку они не учтены в аналитических методах на базе нелинейных уравнений Захарова и Шредингера.
- Опираясь на новые знания о структуре обнаруженных вихревых течений, предложен оригинальный метод корректировки алгоритмов управления волнопродуктором на базе уравнений Захарова и Шредингера путем введения эмпирической функции β . Разработан итерационный метод поиска числовых значений функции β с использованием моделей сложных течений жидкости и газа.

Совокупность новых разработок позволила внести существенный вклад в решение проблемы повышения точности генерации поверхностных волн волнопродукторами, которая имеет важное значение для развития судоходства, морского и прибрежного строительства страны. Экспериментально установленная остаточная погрешность генерации поверхностных волн, оцениваемая среднеквадратичным отклонением свободной поверхности воды, не превышает 0.5...1% в зависимости от режима работы волнопродуктора.

ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях 1-го уровня (Q1) «Белого списка» (Web of Science и Scopus)

1. Khait, A., Shcherba, V., Nosov, E. Numerical and experimental investigation of the hybrid piston compressor using the novel multi-time-scale OpenFOAM[®]-based model. // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 249. – P. 123448-1 - 123448-15. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2024.123448
2. Development and Research of a Promising Pumpless Liquid Cooling System for Reciprocating Compressors. / V.E. Shcherba, A. Khait, E.A. Pavlyuchenko, I.Y. Bulgakova. // Energies. – 2023. – No. 16. – P. 1191-1 - 1191-26. – DOI 10.3390/en16031191
3. Khait, A., Ma, Z. On an eddy viscosity model for energetic deep-water surface gravity wave breaking. // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – Vol. 929. – P. A29-1 - A29-48. – DOI 10.1017/jfm.2021.863
4. Novel Transonic Nozzle for Ranque-Hilsch Vortex Tube. / A. Khait, V. Bianco, A. Lovtsov, A. Noskov, V. Alekhin. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 180. – P. 121801-1 - 121801-11. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121801
5. Khait, A. Third-Order Generation of Narrow-Banded Wave Trains by a Wavemaker. // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 218. – P. 108200-1 - 108200-17. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108200
6. Khait, A., Shemer, L. Nonlinear wave generation by a wavemaker in deep to intermediate water depth. // Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 182. – P. 222 - 234. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2019.04.065
7. Khait, A., Shemer, L. On the kinematic criterion for the inception of breaking in surface gravity waves: Fully-nonlinear numerical simulations and experimental verification. // Physics of Fluids. – 2018. – Vol. 30. – P. 057103-1 - 057103-16. – DOI 10.1063/1.5026394
8. Analysis of the local entropy generation in a double-circuit vortex tube. / A. Khait, A. Noskov, V. Alekhin, V. Bianco. // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 130. – P. 1391 - 1403. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.136
9. A comparison of the application of RSM and LES turbulence models in the numerical simulation of thermal and flow patterns in a double-circuit Ranque-Hilsch vortex tube. / V. Bianco, A. Khait, A. Noskov, V. Alekhin. // Applied Thermal Engineering. – 2016. – No. 106. – P. 1244 - 1256. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.095
10. Numerical investigation of a double circuit Ranque-Hilsch vortex tube. / V. Alekhin, V. Bianco, A. Khait, A. Noskov. // International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – No. 89. – P. 272 - 282. – DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.012
11. Semi-empirical turbulence model for numerical simulation of swirled compressible flows observed in Ranque-Hilsch vortex tube. / A.V. Khait, A.S. Noskov, A.V. Lovtsov,

V.N. Alekhin. // International Journal of Refrigeration. – 2014. – No. 48. – P. 132 - 141.
– DOI 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.006

В изданиях Q2–Q4 «Белого списка» (Web of Science и Scopus)

1. Shcherba, V., Khait, A. Comparative analysis of the regenerative and recuperative cooling of reciprocating compressors // Mechanics Based Design of Structures and Machines. – 2025. – DOI 10.1080/15397734.2025.2505194
2. Zinn, I., Khait, A., Avrahami, I. Validation of the Modified $k - \epsilon$ Turbulence Model for Conical Vortex Tubes Accounting for Compressibility Effects. // Heat Transfer Engineering. – 2025. – P. 1-19. – DOI 10.1080/01457632.2025.2459986
3. Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer in the Chamber in the Piston Hybrid Compressor with Regenerative Heat Exchange. / V. Shcherba, A. Khait, E. Nosov, E. Pavlyuchenko. // Machines. – 2023. – Vol. 11. – P. 363-1 - 363-24. – DOI 10.3390/machines11030363
4. Wind Effects on Wave Overtopping at a Vertical Sea Defense. / S. De Chowdhury, J.G. Zhou, A. Khait, T. Pullen, D. Causon, L. Qian, C. Mingham. // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 149, No. 4. – P. 04023010-1 - 04023010-11. – DOI 10.1061/JWPED5.WWENG-1960
5. Local overshoot and wind effects on wave overtopping at vertical coastal structures. / S. De Chowdhury, J.G. Zhou, A. Khait, D. Causon, L. Qian, C. Mingham., T. Pullen. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Maritime Engineering. – 2023. – Vol. 176, No. 1. – DOI 10.1680/jmaen.2020.33
6. Energy Dissipation and Non-Potential Effects in Wave Breaking. / A. Khait, Z. Ma, L. Qian, W. Bai, Z. Lin. // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2022. – Vol. 32, No. 1. – P. 87 - 96. – DOI 10.17736/ijope.2022.ak43
7. Selection of turbulence model in ANSYS CFX for investigation of turbulent noise and vibration occurring in the interscapular space of the centrifugal turbine. / A. Sekacheva, A. Khait, A. Noskov, L. Pastukhova. // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 139 - 151. – DOI 10.36336/akustika202141137
8. Localized and Distributed Energy in Wave–Current Flow. / S.K. Singh, A. Khait, P.K. Raushan, K. Debnath. // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2020. – Vol. 143(1). – P. 011202-1 - 011202-11. – DOI 10.1115/1.4047521
9. Khait, A., Shemer, L. Application of Boundary Element Method for determination of the wavemaker driving signal. // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2019. – Vol. 141. – P. 061102-1 - 061102-10. – DOI 10.1115/1.4042942
10. Noskov, A.S., Alekhin, V.N., Khait, A.V. Numerical investigation of Ranque-Hilsch energy separation effect. // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – V. 281. – P. 355 - 358. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.281.355

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. A mathematical model of the working processes of a hybrid power displacement piston machine with profiled groove seal. / V.E. Shcherba, V.V. Shalai, V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko, A.S. Noskov, A.Yu. Kondyurin, A.V. Khait. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 54, Nos. 5-6. – P. 335 - 344. DOI 10.1007/s10556-018-0484-1
2. Calculation of liquid flow through pump-compressor slot seal made in the form of hydrodiode. / A.Yu. Kondyurin, V.E. Shcherba, V.V. Shalai, A.S. Noskov, A.V. Khait. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52, Nos. 3-4. – P. 267 - 273. DOI 10.1007/s10556-016-0185-6
3. Analysis and optimization of basic geometric parameters of annular slot seal made in the form of hydrodiode. / A.Yu. Kondyurin, V.E. Shcherba, V.V. Shalai, A.S. Noskov, A.V. Khait. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52, Nos. 3-4. – P. 280 - 289. DOI 10.1007/s10556-016-0187-4
4. Numerical model of thermal protection of building envelope. / R.E. Perminov, V. Bianco, V.N. Alekhin, A.S. Noskov, A.V. Khait, M.N. Popova. // Академический вестник УРАЛ-НИИПРОЕКТ РААСН. – 2016. – №1. – С. 87 - 92.
5. Плешков, С.Ю., Хаит, А.В. Использование несущего теплоизоляционного элемента в российских климатических условиях. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2016. – №6(63). – С. 67 - 73.

6. Исследование энергетической эффективности холодильно-нагревательной системы на базе двухконтурной вихревой трубы. / В.Н. Алехин, А.С. Носков, А.В. Хаит, Р.И. Иванов, Н.М. Аношин. // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2015. – №3. – С. 77 - 81.
7. Носков, А.С., Ловцов, А.В., Хаит, А.В. Моделирование газового потока в двухконтурной вихревой трубе Ранка-Хилша. // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т.5, №3. – С. 313 - 321. – DOI 10.7242/1999-6691/2012.5.3.37
8. Носков, А.С., Ловцов, А.В., Хаит, А.В. Математическое моделирование эффекта энергоразделения Ранка-Хилша с целью увеличения энергетических характеристик вихревой трубы. // Омский научный вестник. – 2011. – №3(103). – С. 182 - 186.
9. Энергетическая эффективность систем искусственного климата на базе вихревой трубы. / А.С. Носков, В.Н. Алехин, А.В. Ловцов, А.В. Хаит. // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2011. – №3. – С. 73 - 77.
10. Энергоэффективность и экономическая целесообразность применения систем искусственного климата на базе вихревой трубы. / А.С. Носков, А.В. Хаит, А.П. Бутымова, С.Ю. Плешков, А.В. Ловцов. // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №1(19). – С. 17 - 23.
11. Носков, А.С., Ловцов, А.В., Хаит, А.В. Математическое исследование структуры газового потока в закручивающем аппарате вихревой трубы. // Омский научный вестник. – 2010. – №1(87). – С. 74 - 77.

Публикации в других изданиях

1. A new integrated finite volume-finite volume numerical model for wave-structure interactions. / R.S. Rai, Z. Ma, L. Qian, W. Bai, Z. Lin, A. Khait. // Proceedings of the 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – ASME, Melbourne, Australia, 2023. – P. OMAE2023-103590-1 - OMAE2023-103590-10. – DOI 10.1115/OMAE2023-103590
2. Deceleration of the Cold Flow in the Vortex Tube. / N. Anoshin, A. Khait, V. Bianco, A. Noskov, V. Alekhin. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 972. – P. 012077-1 - 012077-6. – DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012077
3. Energy Dissipation and Non-Potential Effects in Wave Breaking. / A. Khait, Z. Ma, L. Qian, W. Bai, Z. Lin. // Proceedings of the Thirtieth International Ocean and Polar Engineering Conference. – Shanghai, China, 2020. – P. 2184 - 2191.
4. Khait, A., Shemer, L. Nonlinear generation of narrow-banded wave trains. // Proceedings of the 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – ASME, Glasgow, Scotland, 2019. – P. OMAE2019-95364-1 - OMAE2019-95364-10. – DOI 10.1115/OMAE2019-95364
5. Khait, A., Shemer, L. Application of Boundary Element Method for Determination of the Wavemaker Driving Signal. // Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – ASME, Madrid, Spain, 2018. – P. OMAE2018-77069-1 - OMAE2018-77069-10. – DOI 10.1115/OMAE2018-77069
6. Khait, A., Shemer, L. Wave energy dissipation in two-dimensional breakers. // The 35th Israeli Conference on Mechanical Engineering. – Beer Sheva, Israel, Ben-Gurion University of the Negev, 2018. – P.1-3.
7. Visualization of air flow in vortex tube using different turbulence models. / A.S. Noskov, V.N. Alekhin, A.V. Khait, N.M. Anoshin. // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2015. – No. 1. – P. 43 - 48. – DOI 10.15826/rjct.2015.1.010
8. Хаит, А.В., Носков, А.С., Бьянко, В. Исследование энергетической эффективности климатической системы на основе двухконтурной вихревой трубы. // Образование и наука для устойчивого развития: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых и студентов. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2014. – С. 74.
9. Инновационные системы обеспечения комфортной среды в помещениях. / А.С. Носков, А.В. Хаит, А.А. Маракулина, А.В. Урусов. // Современный город: проектирование, строительство и развитие: Сборник материалов международной научно-практической конференции по строительству и архитектуре. – Екатеринбург, 2014. – С. 292 - 294.
10. Numerical simulation and visualization of air flow in Ranque-Hilsch vortex tube. / A. Khait, A. Noskov, V. Alekhin, A. Antipin. // Proceedings of the 13th International Conference on

- Construction Applications of Virtual Reality (CONVR 2013). – London, UK, 2013. – P. 629 - 638.
11. Mathematical simulation of Ranque-Hilsch vortex tube heat and power performances. / A.V. Khait, A.S. Noskov, V.N. Alekhin, A.V. Lovtsov. // 14th International conference on computing in civil and building engineering (14th ICCCBE): abstract volume. – M.: Publishing House ASV, 2012. – P. 160 - 161.
 12. Носков, А.С., Хаит, А.В. Вихревые трубы как экологичные тепло- и холодогенераторы. // Безопасность критичных инфраструктур и территорий: Материалы V Всероссийской конференции и XV школы молодых ученых. – Екатеринбург, УрО РАН: Изд-во АМБ, 2012. – С. 143 - 144.
 13. Носков, А.С., Хаит, А.В., Энгель, В.Ю. К вопросу о влиянии второй предкамеры на рабочие процессы аксиально-поршневой гидромашины. // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО “Кузнецов” и 70-летию СГАУ, Самара, 5-7 сентября 2012 года: сборник трудов в 3-х томах. Том 2. Международная научно-техническая конференция с участием молодых ученых “Динамика и виброакустика машин”. – Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. – С. 179 - 181.
 14. Ловцов, А.В., Носков, А.С., Хаит, А.В. Оптимизация устройства закрутки газового потока, применяемого в вихревых трубах Ранка-Хилша. // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвертая международная конференция: тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 282 - 283.
 15. Разработка численной модели процесса энергоразделения, возникающего в разделительной вихревой трубе. / А.В. Ловцов, А.В. Хаит, А.П. Бутымова, А.С. Носков. // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмо-автоматика: Труды XIV всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: сборник докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 146 - 149.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Хаит, А.В., Щерба, В.Е. PyWavemakerW. // Свидетельство №2025669129 о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация : заявл. 11.07.2025 : опубл. 23.07.2025 ; заявитель и правообладатель Хаит А.В.
2. Хаит, А.В., Щерба, В.Е. PyWavemakerZ. // Свидетельство №2025669130 о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация : заявл. 11.07.2025 : опубл. 23.07.2025 ; заявитель и правообладатель Хаит А.В.
3. Вихревая труба. / А.В. Ловцов, А.С. Носков, В.П. Сыропятов, А.В. Хаит. // Патент на изобретение RU №2533590 C2, Российская Федерация, F25B 9/04 (2006.01) : №2013104581/06 : заявл. 04.02.2013 : опубл. 10.08.2014. Бюл. №32 ; заявитель и патентообладатель ООО “КБ “ЧКЗ-ЮГСОН”.
4. Переносной парогенераторный модуль с циркуляцией выхлопных газов. / В.П. Сыропятов, А.В. Ловцов, А.В. Хаит, А.С. Пильник, В.И. Чернобородов. // Патент на полезную модель RU №124367 U1, Российская Федерация, F22B 33/18 (2006.01) : №2012135922/06 : заявл. 21.08.2012 : опубл. 20.01.2013. Бюл. №2 ; заявитель и патентообладатель ООО “КБ “ЧКЗ-ЮГСОН”.
5. Циклическая сушилка семян и зерна. / В.П. Сыропятов, А.В. Ловцов, А.В. Ан, Ю.А. Кирсанов, А.В. Хаит. // Патент на изобретение RU №2406952 C1, Российская Федерация, F26B 9/06 (2006.01) : №2009128539/06 : заявл. 23.07.2009 : опубл. 20.12.2010. Бюл. №35 ; заявитель и патентообладатель ООО “КБ “ЧКЗ-ЮГСОН”.

Подписано к печати 10.12.2025. Формат 60х90 1/16.

Бумага офсетная. Оперативный способ печати. Усл. п.л. 2,25

Тираж 100 экз. Заказ № 245

Отпечатано в типографии ООО «АН2»
644080, г. Омск, ул. 4 Поселковая, 26/2