

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Месропяна Арсена Владимировича
на диссертационную работу **Хайта Анатолия Вильича**
на тему «Разработка и реализация методологических основ расчета сложных
закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и
пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по научной специальности 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная,
компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

Диссертационная работа Хайта Анатолия Вильича посвящена развитию методов математического моделирования сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений жидкости и газа для совершенствования гидравлических и пневматических устройств.

1. Актуальность и значимость темы исследования

Рабочий процесс гидравлических машин и аппаратов представляет собой, как правило, трехмерное турбулентное течение вязкой капельной жидкости или газа в проточной части гидро- и пневмоагрегатов сложной геометрии. Например, рабочие процессы динамических и объемных машин, водометных и винтовых движителей скоростных судов, крыльчаток, импеллеров, миксеров и т.п. Такие течения жидкости характеризуются одновременным протеканием ряда гидродинамических процессов и явлений, математическое моделирование которых представляет большую сложность.

Математические модели рабочих процессов гидропневматических машин и аппаратов представляют собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, которые решаются численными методами конечных элементов или объемов. В связи со сложностью численных методов решения дифференциальных уравнений модели с учетом фактической сложной

геометрии проточной части, для решения задач, как правило, применяют коммерческие программные пакеты, такие как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CCM, FlowVision и др. Основной проблемой в таких задачах является обеспечение требуемой точности при верификации математической модели результатами экспериментальных данных.

В диссертации рассматриваются два особенно сложных случая – рабочие процессы в вихревых трубах и в поршневых волнопродукторах. Использование коммерческих программных пакетов с заложенными в них моделях турбулентных течений для исследования и проектирования данных устройств приводит к большим погрешностям в диапазоне 15÷30% и более, что существенно сказывается релевантности результатов имитационного моделирования в указанных пакетах.

Диссертационная работа посвящена решению указанной проблемы путем глубокого теоретического и экспериментального изучения гидродинамических процессов, протекающих в гидро- и пневмоаппаратах.

Цель исследования состоит в разработке методологии расчета и моделирования одно- и двухфазных течений в гидропневмоагрегатах на основе уточненных моделей трехмерного турбулентного течения жидкости и газа, а также в их практическом применении для разработки новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение для страны. С учетом важности решения выявленной проблемы и поставленной цели, считаю тему диссертационного исследования важной и актуальной.

2. Степень достоверности и обоснованности положений диссертации

Научные положения и выводы диссертации считаю достоверными и обоснованными. Это обуславливается следующим: исследования опираются на фундаментальные уравнения сохранения массы, импульса и энергии; корректно используются современные численные методы (методы конечных объемов, граничных элементов, распределенных вычислений); применяется детальная верификация результатов численного исследования. В работе используются апробированные методы планирования и проведения численных и натурных

экспериментов, а также соответствующие методы анализа результатов экспериментальных исследований.

3. Новизна результатов и выводов работы

Новыми научными результатами, полученными в диссертационной работе, являются теоретические разработки соискателя, результаты численного моделирования рабочих процессов гидропневмоаппаратов, результаты физических экспериментов по измерению рабочих характеристик аппаратов, новые технические решения, направленные на повышение эффективности рабочих процессов гидропневмоаппаратов, а именно:

1. Значительно усовершенствованные математические модели трехмерных турбулентных течений вязкой капельной жидкости и газа в проточных частях гидропневмоаппаратов. Полученные уравнения математических моделей корректно отражают гидродинамические и теплообменные процессы в вихревых трубах и поршневых волнопродукторах.

2. Результаты экспериментальной калибровки и верификация усовершенствованных моделей турбулентных течений. Результаты экспериментов показывают, что применение усовершенствованных математических моделей обеспечивает погрешность моделирования рабочих процессов вихревых труб и поршневых волнопродукторов на уровне $2 \div 10$ %, что существенно ниже погрешностей, которые дают общеизвестные программные продукты, указанные выше.

3. Выявлены новые физические явления, которые необходимо учитывать при проектировании вихревых труб и поршневых волнопродукторов: паразитная зона течения в вихревой трубе, возможность и причины дестабилизации течения в вихревой трубе, вихревые течения вследствие работы волнопродуктора и обрушения волн.

4. Разработанная методология расчета и математического моделирования трехмерных турбулентных течений вязкой жидкости применена для повышения энергоэффективности вихревой трубы за счет увеличения ее интегральных характеристик. В диссертационной работе показано увеличение КПД вихревой трубы на 4...5%, что следует считать существенным результатом.

5. Разработанная методология расчета и математического моделирования течений вязкой жидкости использована для совершенствования работы поршневых волнопродукторов. Предложен новый аналитический метод с эмпирическими поправками для задания сложного движения волнопродуктора. Экспериментально доказано, что имплементация нового метода в системах компьютерного управления значительно улучшает основную рабочую характеристику волнопродуктора, а именно точность воспроизведения нужной формы волны на поверхности воды. Результаты экспериментальных исследований показывают уменьшение погрешности генерации волн с $8\div 15\%$ до значений порядка 1% .

4. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработанных теоретических основах и соответствующих уравнениях математических моделей, которые корректно отражают гидрогазодинамические и теплообменные процессы, определяющие работу вихревых труб и поршневых волнопродукторов. В диссертации предложена новая аналитическая теория работы волнопродуктора, которая впервые учитывает нелинейные поправки 3-го и более высоких порядков нелинейности. К важным результатам исследования также относятся результаты анализа физических явлений в проточных частях вихревых труб и волнопродукторов.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в реализации разработанной методологии расчета и численного моделирования рабочих процессов гидропневмоаппаратов, за счет этого были разработаны новые технические решения (элементы вихревых труб и алгоритмы управления волнопродукторами), практическое внедрение которых привело к повышению эффективности работы устройств. Предложенные оригинальные технические решения защищены 2 патентами РФ на изобретение, 1 свидетельством на полезную модель и 2 программами для ЭВМ. К диссертации прикреплены справки о промышленном и лабораторном внедрении результатов исследования от конструкторского бюро ЧКЗ-ЮГСОН, акционерного общества КЭНПО и Тель-Авивского университета.

5. Общая оценка содержания работы

Введение раскрывает актуальность темы диссертации, в нем дана формулировка цели работы и задач исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту и данные об объеме и структуре работы.

Докторская диссертация состоит из 8 глав, содержит 459 страниц, включая 150 рисунков и 25 таблиц, библиографический список из 427 наименований и 8 приложений.

В **первой главе** представлены результаты анализа современного состояния методов расчета и моделирования турбулентных течений жидкости и газа. Рассмотрены подходы к математическому описанию трехмерных турбулентных течений вязкой капельной жидкости и газа. Приведен анализ недостатков и ограничивающих факторов, пробелов в научном знании, что послужило основой для выбора и обоснования направлений исследования.

Во **второй главе** рассматриваются вихревые трубы Ранка-Хилша, их конструкция, основные характеристики, влияние формы и размеров проточной части на изоэнтропный и холодильный КПД вихревой трубы. Анализ схемных решений современных вихревых труб показывает, что основным фактором, сдерживающим расширение областей применения вихревых труб в различных отраслях промышленности, является их низкая энергоэффективность, что обуславливает необходимость решения проблемы повышения эффективности работы вихревых труб с применением методов математического моделирования. Наглядно показаны недостатки существующих математических моделей в рамках коммерческого пакета программ ANSYS. Рассмотрена формулировка стандартной анизотропной модели турбулентности рейнольдсовых напряжений RSM-LRR-std, а также стандартной изотропной модели турбулентности $k-\varepsilon$ -std. Получены уравнения модифицированной модели течения с учетом поправки Ван Деємтера на сжимаемость газа, которая более полно отражает газодинамические процессы в вихревой трубе.

В **третьей главе** разработана модифицированная модель турбулентного течения в гидроволновом лотке с волнопродуктором. Рассмотрены вопросы лабораторных и численных исследований поверхностных волн. Сложности,

возникающие при физическом моделировании в гидроволновых лабораториях, определяют необходимость создания «численных гидроволновых лабораторий» и корректности математического описания физических процессов, протекающих в лабораторном волновом лотке. Автором разработана комбинация двух математических моделей для исследования рабочих процессов поршневых волнопродукторов. Первая модель использует метод Volume-of-Fluid для двухфазной смеси, в то время как вторая модель базируется на допущении о квазипотенциальности течения. Предложено использование кинематического критерия обрушения волн для поиска величины турбулентной вязкости. Для этого требуется его экспериментальная калибровка.

В **четвертой главе** проводится исследование течения газа в вихревой трубе с применением стандартной и модифицированной моделей турбулентности. Выполнена калибровка разработанной модели турбулентного течения газа в вихревой трубе. Найдена величина эмпирической замыкающей постоянной $c_\gamma = 0.985$. Установлено, что использование разработанной и откалиброванной модели турбулентного течения газа приводит к существенному повышению точности определения интегральных характеристик вихревой трубы, в том числе ее КПД.

В **пятой главе** рассматриваются вопросы усовершенствования геометрии проточной части вихревой трубы для повышения ее энергоэффективности. Приводятся результаты численного и экспериментального исследования двухконтурной и разделительной вихревых труб. Приводится описание созданной экспериментальной установки. Разработаны новые элементы вихревой трубы: принципиально новый тип соплового ввода вихревой трубы, новый способ эффективного торможения высокоскоростного потока газа на холодном выходе вихревой трубы, исследован радиальный щелевой диффузор для торможения газа на выходе горячего потока вихревой трубы. Приведены сведения о промышленной верификации результатов исследования.

В **шестой главе** выполнены детальные численные и экспериментальные исследования течения жидкости в гидроволновом лотке, сгенерированного поршневым волнопродуктором. Найдена величина эмпирической замыкающей постоянной модели течения жидкости: $B_x = 1$. Экспериментально установлена

высокая точность разработанного и откалиброванного кинематического критерия обрушения.

В **седьмой главе** теоретически исследованы рабочие процессы поршневого волнопродуктора. Предложены и разработаны два новых слабо-нелинейных алгоритма управления волнопродуктором, в основе которых лежат уравнения Захарова и Шредингера. Использование уравнения Шредингера дало возможность впервые найти выражения для поправок 3-го порядка нелинейности и, тем самым, повысить эффективность работы волнопродуктора.

В **восьмой главе** выполнено численное и экспериментальное исследование разработанных слабо-нелинейных алгоритмов управления волнопродуктором. Установлено, что ошибки работы волнопродуктора вызваны, прежде всего, формированием сложных вихревых течений в непосредственной близости от волнопродуктора. Существование данных течений было впервые обнаружено при помощи разработанных математических моделей. Введение эмпирических поправок в слабо-нелинейные алгоритмы управления волнопродуктором позволило повысить эффективность и точность работы последнего.

Приложения содержат математические выражения, формулировки численных методов, результаты исследования сеточной устойчивости, листинги некоторых компьютерных программ, копии патентов и свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, копии справок о внедрении результатов работы.

По теме диссертации автор имеет 54 опубликованные работы, в том числе 21 статью в изданиях Белого списка, включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus, из них 11 статей в изданиях 1-го уровня Q1. Опубликовано 11 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Получено 3 патента РФ на изобретение и полезную модель, 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

6. Соответствие автореферата содержанию диссертации

Автореферат представленной диссертации в полной мере соответствует ее содержанию, отражает основные положения и выводы. Автореферат написан

грамотным и понятным научным языком, качественно оформлен и проиллюстрирован.

7. Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации особый акцент делается на использовании гипотезы Буссинеска для замыкания системы уравнений математических моделей трехмерных течений жидкости. Гипотеза Буссинеска, в свою очередь, базируется на допущении об изотропии турбулентности. Считаю такое упрощение необоснованным и, в некоторой степени, недопустимым применительно к рассматриваемым течениям и рабочим процессам гидро- и пневмоаппаратов. Почему соискатель считает возможным исключить анизотропные модели рейнольдсовых напряжений из исследования?

2. Ряд параметров математических моделей, в том числе граничные условия, принимаются без должных пояснений. В качестве иллюстрации можно обратить внимание на параметры, заданные в разделе 2.5, а также в главах 4 и 6: величины давления, температуры, периода волны, круговой частоты и т.д. Например, период волны практически для всех случаев в диссертации принят равным 0,7 с. С другой стороны, температура газа часто выбирается равной 300 К. Чем объясняется повсеместный выбор именно этих значений? Каков допустимый диапазон по температуре для обеспечения приемлемой точности моделирования?

3. Верификация основных положений, полученных при помощи вычислительных экспериментов, выполняется на специально созданной экспериментальной установке, позволяющей исследовать двухконтурные и разделительные вихревые трубы, однако в диссертации не приводится информация о массиве экспериментальных точек, полученных в ходе экспериментов, статистической обработке экспериментальных данных для последующей верификации численных экспериментов. Соответственно, нет возможности оценить воспроизводимость результатов экспериментов.

4. В п.5.3.1 рассматривается принципиально новый тип соплового ввода – сверхзвуковой; при этом автором отмечается, что сверхзвуковой сопловой ввод обеспечивает рост холодильного КПД примерно на 1 %. Эта величина

сопоставима или даже ниже уровня погрешностей лабораторного оборудования или результатов численных экспериментов, что предопределяет необходимость дополнительных пояснений по значимости полученного роста КПД.

5. Автором в п.5.3.2 отмечается, что наиболее эффективным является развихритель №2, при этом там же отмечается, что «...можно предположить наличие некоторого резерва для еще более значительного повышения энергоэффективности вихревой трубы после тщательной оптимизации развихрителя №2»... Соответственно, возникает вопрос, насколько еще возможно повышение энергоэффективности вихревой трубы в таком случае, и что входит в понятие «тщательная оптимизация»?

6. Схема на рис. 7.6 совершенно неясна. Если перемещение волнопродуктора задается функцией $X(t)$, то его поверхность будет отклоняться от изначально вертикального положения. А если это так, то на величину $X(t)$ должны быть наложены строгие ограничения. В противном случае, геометрия проточной части может быть значительно искажена, а полученные аналитические выражения потеряют смысл. Почему этот вопрос не затрагивается?

7. В работе приведены сведения о практическом применении результатов исследования в исследовательских лабораториях и промышленности. Какие конкретно результаты исследования нашли практическое применение? Насколько, например, эффективны вихревые трубы, применяемые в промышленной установке нагрева воздуха, упомянутой в справке о внедрении результатов исследования? К сожалению, в диссертации не удалось найти хорошо структурированный и понятный список практических рекомендаций.

8. Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация соответствует требованиям пунктов 1–5 паспорта научной специальности 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы:

п.1. Математическое моделирование и оптимизация гидравлических, вакуумных, компрессорных машин, пневмооборудования и гидро- и пневмосистем, технических и технологических систем на их базе.

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

9. Соответствие работы критериям, установленным положением «О порядке присуждения ученых степеней»

Диссертация Хаита Анатолия Вильича является законченным научным исследованием, отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора технических наук, согласно пп. 9–14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней», и содержит новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. А именно, принципиально новые элементы вихревой трубы и новые алгоритмы управления волнопродуктором, внедрение которых дало существенный рост эффективности (в том числе энергоэффективности) устройств.

Оценка актуальности темы диссертации, объема теоретических и экспериментальных исследований, научной новизны, теоретической значимости и практической ценности результатов исследований позволяет заключить, что автор диссертации «Разработка и реализация методологических основ расчета

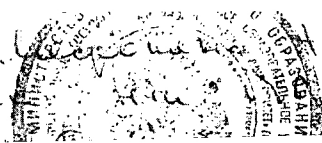
сложных закрученных турбулентных одно- и двухфазных течений в гидро- и пневмоаппаратах на основе гипотезы Буссинеска» Хаит Анатолий Вильич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Официальный оппонент

Месропян Арсен Владимирович,
доктор технических наук по специальности
05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты,
профессор, директор Института экосистем бизнеса
и креативных индустрий
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной
технический университет» (УГНТУ)
450078, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145
Телефон: +7 (347) 228 91 34
E-mail: avm_74@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное
образования «Уфимский государственный
(УГНТУ)

450064, Приволжский федеральный округ
ул. Космонавтов, д. 1
Тел.: +7 (347) 242-03-70
E-mail: info@rusoil.net

Арсен Владимирович Месропян


Я, Месропян Арсен Вла
персональных данных в диссертации
Анатолия Вильича, и их даю

свое
отзыв



С отзывом от
28.01.2026 *Хаит*
А.В. Хаит