

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Кривоногова Алексея Александровича, представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 –
Математическое моделирование численные методы и комплексы программ на
тему: *«Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого
течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала»*

Актуальность темы диссертации

В настоящее время потребность промышленности в применении систем компьютерного моделирования для имитации различных физических процессов постоянно растет. Применение систем позволяет ускорить процесс разработки новых продуктов и повысить качество. Одними из основных направлений является вычислительная гидродинамика, позволяющая имитировать процессы течения жидкостей и газов. Исследования методов математического моделирования гидродинамических течений, и их реализация в виде систем компьютерного моделирования являются актуальными, прежде всего в связи с широким применением в различных предметных областях для имитации натурального эксперимента, или полного его замещения. При моделировании нестационарного турбулентного потока в трехмерной постановке необходимо использовать вычислительную сетку высокой плотности для разрешения малых вихрей, что значительно замедляет вычислительный процесс и в свою очередь увеличивает время моделирования. Наиболее ярким примером является проточная часть вихревого расходомера, поскольку процесс вихреобразования является нестационарным и трехмерным.

Несмотря на большое количество исследований по численному моделированию турбулентных течений актуализация тематики диссертационного исследования А. А. Кривоногова обусловлена решением одной из основных проблем математического моделирования турбулентных течений – длительным временем вычислений. Работа посвящена разработке и реализации научно обоснованных методов и алгоритмов, представленных в виде системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения, направленных на повышение эффективности процесса разработки новых изделий, таких как вихревые расходомеры, теплозащитные гильзы, запорные клапаны и др. Разработка системы, позволяющей сократить время моделирования без потери точности результатов имеет важное народнохозяйственное значение и несомненно, **является актуальной**.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 140 наименований и трех приложений. Общий объем работы составляет 197 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проанализирована степень разработанности тематики, определены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значи-

мость работы, методология и методы ее исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы. представлены результаты внедрения на промышленном предприятии.

В первой главе *«Анализ современных методов математического моделирования нестационарных, вихревых течений на примере вихревого расходомера»*. Представлено описание процесса вихреобразования Кармана на примере вихревого расходомера. Проанализированы современные методы моделирования турбулентных течений и методы оптимизации. Обозначена основная проблема моделирования вихревых потоков – длительное время. Представлены обоснование актуальности, цель и основные требования к разрабатываемой системе компьютерного моделирования.

Вторая глава *«Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала»* посвящена разработке функциональной структуры предлагаемой системы компьютерного моделирования. Выбран путь решения поставленной задачи за счет перехода от трёхмерного моделирования к двумерному посредством применения нового метода трансформации параметров сигнала вихревого течения. Разработан метод оптимизации проточной части вихревого расходомера, основанный на целевой функции и критерии оптимизации собственной разработки с применением алгоритма поиска оптимального решения, предложенного Розенброком.

Третья глава *«Разработка численных методов и алгоритмов, программная реализация»*. Представлены численные методы и алгоритмы с последующей программной реализацией в виде системы компьютерного моделирования. Изложен разработанный вычислительный алгоритм трансформации параметров сигнала двумерного течения в эквивалентные значения трехмерного процесса, определены функциональные зависимости для амплитуды, частоты и фазы. Показан численный алгоритм оптимизации вихревого течения. Для ясности понимания представлена блок-схема разработанной системы компьютерного моделирования и ее программная реализация с кратким описанием работы программного обеспечения.

Четвертая глава *«Верификация системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения»* посвящена верификации и практической апробации разработанной системы компьютерного моделирования, в ней представлено сравнение результатов расчета на плоской и трехмерной моделях, а также сопоставление с экспериментальными данными. Описаны результаты применения на промышленном предприятии АО «ПГ «Метран», показывающие высокую эффективность применения предлагаемой системы на практике. В заключительной части главы приведены примеры использования системы в различных производственных процессах и исследовательских работах.

В заключении содержатся основные итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Новизна полученных результатов в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 заключается в следующем:

В области математического моделирования. Представлена система ком-

пьютерного моделирования для исследования процесса нестационарного вихреобразования, позволяющая выполнять вычисления в 40 – 50 раз быстрее метода, основанного на трехмерной математической модели, в основе которой лежит аналитическая формула трансформации параметров сигнала плоского течения в значения для трехмерного потока, и целевая функция для оптимизации вихревого потока Кармана.

В области численных методов. Создан вычислительный метод восстановления параметров трехмерного периодического сигнала по результатам вычислений на двумерной модели, позволяющий сократить количество расчетных точек для спектральной обработки сигнала в 5 – 7 раз по сравнению с общепринятым подходом обработки сигнала, заключающемся в применении быстрого преобразования Фурье. Достигается это благодаря применению метода минимизации Ньютона. Разработан численный метод выбора оптимальной конфигурации проточной части вихревого расходомера по заданным критериям, позволяющий выполнять поиск экстремума целевой функции в заданном диапазоне параметров в соответствии с целевой функцией.

В области комплексов программ. Автором предложены оригинальные программные продукты «Вихрь – 2D» и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D», в которых реализована разработанная автором система компьютерного моделирования. Программный комплекс «Вихрь – 2D» работает совместно с программным пакетом для имитационного моделирования ANSYS и позволяет подключать различные программные пакеты для численного моделирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается согласованностью результатов моделирования выполненных с применением разработанной автором системы компьютерного моделирования и расчётов на вихреразрешающих моделях в трехмерной постановке; выполненными натурными экспериментами; результатами тестирования разработанного программного обеспечения в деятельности промышленного предприятия АО «ПГ «Метран» на испытательной установке «Метран – УПА – 2000», которая является вторичным эталоном.

Значимость результатов, полученных автором диссертации для науки и практики

В диссертационной работе А.А. Кривоноговым предложена новая система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения, содержащая двухэтапный метод обработки и восстановления сигнала, аналитическую формулу трансформации параметров сигнала и численный метод оптимизации формы проточной части. В результате чего выполнен вклад в развитие методов обработки сигналов, теории методов компьютерного моделирования вихревого течения Кармана в проточных частях устройств и теории методов поиска оптимальных решений.

С практической стороны предложенная система, позволяет: выполнять

расчеты в 40 – 50 раз быстрее, чем моделирование в трехмерной постановке; получать оптимальные параметры проточных частей устройств и повышать качество разрабатываемых изделий.

Разработанное программное обеспечение «Вихрь – 2D» внедрено в деятельности АО «ПГ «Метран» в качестве программного обеспечения для подробного анализа вихревых процессов в проточной части вихревых расходомеров, что является практическим подтверждением применимости, разработанной А.А. Кривоноговым системы компьютерного моделирования. Предложенную систему компьютерного моделирования рекомендуется использовать в деятельности университетов, промышленных предприятий и институтов для оптимизации вихревых течений, для исследования вихревых процессов в стесненных каналах и создания новых измерительных устройств по типу вихревого расходомера.

Публикации и апробация работы

Полученные результаты полностью опубликованы, апробированы на различных всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации соискателем опубликовано 12 научных работ. Среди них 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК, 2 в изданиях, индексируемых международной реферативной базой данных SCOPUS, одна в WoS, 2 программы для ЭВМ. Имеется Акт о внедрении системы компьютерного моделирования в деятельность АО «ПГ «Метран».

По содержанию работы имеются следующие **вопросы и замечания:**

1. При переходе от 3D к 2D модели расчета при цилиндрической проточной части и осесимметричном теле обтекания наиболее логичным было бы иметь решение в цилиндрической системе координат. Однако в ANSYS CFX такая возможность отсутствует. В диссертации нет достаточного обоснования пределов корректности перехода к плоской декартовой модели при расчете турбулентного течения с ярко выраженными макропульсациями. Например, коэффициент загромождения K_q в цилиндрической системе координат $K_q = D^2/H^2$, а в предлагаемой 2D модели $K_q = D/H$. Почему для ускорения расчетов не были использованы другие САЕ-пакеты, где есть возможность выбора 2D модели, в том числе и с применением цилиндрической системы координат?

2. Можно ли пользоваться предлагаемыми алгоритмами, включающими 2D модель и ее адаптацией при обтекании тел, не имеющих осевую симметрию, например показанных на рис. 1.13?

3. В п. 2.3 (стр. 101, 102) недостаточно обоснован механизм выбора количества и расположения «базовых точек» для детектирования сигнала пульсаций вихрей на двумерной и трехмерной численных моделях.

4. Не совсем ясно как были выбраны параметры, входящие в целевую функцию (2.13)? Например, диссертант пишет, что исходными физическими свойствами измеряемой среды является давление и температура (стр. 109), однако они не вошли в качестве параметров в целевую функцию. Почему эти параметры (кроме числа Re) не задавались в безразмерном виде? Возможно, что

для обобщения результатов имело смысл сюда включить безразмерные величины: число Эйлера Eu , вместо D использовать коэффициент загромождения K_q , который существенно влияет на число Sh (рис. 1.5, формула (1.6)) и вместо геометрических характеристик входящих в выражение (2.13) выбрать симплексы, а в качестве характерного размера – H . Подобные же вопросы возникают при выборе параметров «передаточной функции» (формула (2.11), стр. 99).

5. Из диссертации и автореферата осталось непонятным, как получена формула (3.6) (стр. 129) функциональной зависимости передаточного коэффициента частоты вихреобразования K_f от размеров проточной части вихревого расходомера. Как объяснить, что K_f слабо зависит от числа Re и свойств жидкости?

6. В п. 4.3 недостаточно полно описаны допустимые возможности применения предложенного программного обеспечения для исследования и оптимизации существующего довольно широкого спектра расходомеров.

7. Текст диссертации содержит незначительное количество стилистических ошибок и опечаток, есть повторы текста. Хотя входных геометрических параметров проточной части относительно немного, однако в разных частях диссертации они имеют разное обозначение и отличающегося от общего списка обозначений (стр. 179). Рисунки 2.27–2.29, взятые из работы [113], можно было представить в более наглядном и читаемом виде.

Все рассмотренные замечания лишь в небольшой степени снижают общие положительные оценки диссертации А.А. Кривоногова. Вне всякого сомнения, он в своей работе проявил высокую эрудицию и грамотность. Необходимо отметить его квалификацию в области математического и компьютерного моделирования сложных гидрогазодинамических процессов, всестороннее рассмотрение сложного объекта исследования (система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения), системное изучение его основных элементов и их взаимодействия.

Диссертация А.А. Кривоногова имеет последовательную, логически законченную структуру, **автореферат** соответствует содержанию диссертации и полностью отражает основные научные и практические результаты диссертационного исследования.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа А.А. Кривоногова «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала» представляет собой законченную научно – квалификационную работу, в которой содержится решение научно-практической задачи, имеющей значение для математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Полученные результаты соответствуют научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в частности по пунктам:


8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп. 9–14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор *Алексей Александрович Кривоногов*, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Профессор кафедры вычислительной техники
и программирования
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
доктор технических наук, профессор

 / И.М. Ячиков

Ячиков Игорь Михайлович
Телефон: +7-351-929-85-63.

Электронная почта: jachikov@mgpu.ru

Адрес: 455000, Россия, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д.38, МГТУ им. Г.И. Носова

