

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»,

доктор технических наук, доцент

А.А. Дьяконов

2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Диссертация «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала» выполнена на кафедре «Летательные аппараты».

В период подготовки диссертации соискатель Кривоногов Алексей Александрович работал в Акционерном обществе «Промышленная Группа «Метран» в должности инженера-конструктора с 2013 года по настоящее время и в должности инженера-исследователя в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Летательные аппараты» с 2018 года по настоящее время.

Соискатель в 2013 году поступил и в 2016 году окончил очную аспирантуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

В 2013 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по специальности «Ракетостроение», с квалификацией «инженер».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2018 году Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – Карташев Александр Леонидович, доктор технических наук, доцент, декан Аэрокосмического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Тема диссертации утверждена на заседании совета Аэрокосмического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) 24 декабря 2013 года.

По результатам рассмотрения диссертации «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направленность исследования

Тема диссертации относится к современному и стремительно развивающемуся направлению научных исследований в области численного моделирования турбулентных течений – вычислительной гидрогазодинамики (CFD). Большинство систем компьютерного моделирования гидрогазодинамических течений, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, FLOWEFD, OpenFOAM, основываются на системе уравнений Навье – Стокса с осреднением по Рейнольдсу (RANS). В настоящее время накоплен обширный материал по математическому моделированию

турбулентных течений при помощи RANS метода, представленный в работах зарубежных и отечественных исследователей D.C. Wilcox, П. Роуча, С. Патанкара, И.А. Белова, Р.А. Spalart, и др., но вопрос о длительном времени моделирования остается актуальным, в особенности при выполнении нестационарных расчетов гидрогазодинамических течений таких, как эффект периодического вихреобразования Кармана. Эффект наблюдается в различных областях техники, архитектуры, медицины и др, о чем свидетельствуют труды Т. Von Karman, R.C. Baker, R.W. Miller, Л.Г. Лойцянского, П.П. Кремлевского и др. В данной работе в качестве примера реализации представлена проточная часть вихревого расходомера, поскольку процесс ее оптимизации, под заданные параметры весьма длительный и дорогостоящий.

К настоящему моменту моделирование вихревого течения Кармана в проточной части вихревого расходомера осуществляется в трехмерной постановке, так как течение является пространственным. Трехмерное моделирование, обладает существенным недостатком – значительным временем вычислений. Больше всего данный недостаток проявляется при решении задач оптимизации, о чем свидетельствуют результаты работ Сафонова Е.В, Богданова В.Д.

Таким образом актуальной является задача разработки высокоэффективной системы компьютерного моделирования и оптимизации, позволяющей выполнять оптимизацию формы проточного тракта вихревого расходомера и других устройств с вихревым течением Кармана за приемлемое время (1–3 месяца) с необходимой точностью получаемых результатов.

Научная новизна результатов

В области математического моделирования: в диссертационной работе предложена новая система компьютерного моделирования для исследования процесса нестационарного вихреобразования, позволяющая выполнять моделирование в 40 – 50 раз быстрее, чем метод, основанный на трехмерной математической модели; разработана аналитическая формула трансформации параметров сигнала плоского течения в значения для трехмерного потока, позволяющая определять передаточный коэффициент для преобразования значения частоты

вихреобразования; разработана целевая функция для оптимизации проточной части вихревого расходомера, в качестве критерия оптимизации используется величина максимального относительного отклонения числа Струхала от среднего значения в заданном диапазоне чисел Рейнольдса. Благодаря использованию данного критерия, появилась возможность выполнять оптимизацию во всем рабочем диапазоне расходомера по одному выходному параметру.

В области численных методов: разработан вычислительный метод восстановления параметров пространственного периодического сигнала по параметрам плоского течения, который основан на двухэтапном алгоритме, снижающем количество расчетных точек для спектральной обработки сигнала в 5 – 7 раз по сравнению с Фурье анализом; разработан вычислительный 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. Поиск осуществляется по алгоритму, предложенному Розенброком с выполнением численного моделирования на каждом шаге, вместо функции оптимизации определенного вида.

В области комплексов программ: Разработаны программные модули «Вихрь - 2D» и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь - 2D», в которых реализована разработанная система компьютерного моделирования, содержащая вычислительный метод трансформации параметров сигнала и последующей оптимизации проточной части методом Розенброка с дискретным шагом. Предложенная система, реализованная в виде программного комплекса «Вихрь - 2D», работает совместно с программным пакетом для имитационного моделирования ANSYS и позволяет подключать различные программные пакеты для численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертационного исследования обусловлена решением актуальной задачи, связанной с разработкой высокоэффективной системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения.

Представленные результаты развивают теории математического моделирования нестационарных турбулентных течений при помощи метода RANS, благодаря предложенной аналитической формуле трансформации параметров сигнала плоского течения в значения пространственного, развивают теорию обработки сигналов, благодаря предложенному двухэтапному методу обработки и восстановления сигнала. Представленный численный метод оптимизации, основанный на двумерной численной модели, целевой функции и методе Розенброка с дискретным шагом, развивает методы оптимизации проточных частей устройств с эффектом нестационарного вихреобразования Кармана, таких как вихревые расходомеры.

Практическая значимость работы обусловлена предложенной системой компьютерного моделирования в виде комплекса программ, позволяющей выполнять расчеты в 40 – 50 раз быстрее, чем общепринятый подход, основанный на трехмерной математической модели и одноэтапной спектральной обработке. В результате, удастся получать оптимальную форму проточной части вихревого расходомера при минимальном количестве затрачиваемого времени. Показана применимость разработанной системы компьютерного моделирования в различных областях. Использование предложенной системы компьютерного моделирования и оптимизации дает возможность получать проточные части и тела обтекания с заданными рабочими характеристиками, вследствие чего повышается качество разрабатываемых изделий. Для вихревого расходомера расширяется рабочий диапазон и повышается точность измерения. В результате экспериментальных тестирований, основные результаты работы были внедрены в деятельности АО «ПГ «Метран» в качестве программного обеспечения для оптимизации проточных частей вихревых и вихреакустических расходомеров, а также подробного анализа процессов вихреобразования в проточной части, о чем свидетельствует акт о внедрении.

Степень достоверности результатов проведенных соискателем исследований.

Достоверность научных результатов и выводов обеспечивается корректным использованием методов математического моделирования, согласованием вычислительных экспериментов 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 Акционерное общество «Промышленная Группа «Метран» и апробацией в ходе всероссийских и международных научно-практических конференций. Результаты и выводы не противоречат ранее полученным результатам других авторов.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем.

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах:

1. Кривоногов, А.А. Математическая модель трансформации параметров плоского течения в пространственные и метод оптимизации на ее основе / А.А. Кривоногов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 38-49. (ВАК)

2. Кривоногов, А.А. Математическая модель трансформации двумерного течения в проточном тракте вихревого расходомера в трехмерное течение / А.А. Кривоногов, А.Л. Карташев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 93-102. (ВАК)

3. Krivonogov, A.A. Mathematical modeling of vortex generation process in the flowing part of the vortex flowmeter and selection of an optimal turbulence model / A.A. Krivonogov, A.L. Kartashev // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. – 2016. – Vol. 9, № 4. – P. 117-128. (ВАК, SCOPUS, WoS)

4. Кривоногов, А.А. Исследование пространственных гидрогазодинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера / А.А. Кривоногов, А.Л. Карташев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 5-13. (ВАК)

5. Кривоногов, А.А. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров / В. Д. Богданов, А.В. Конюхов, А.А. Кривоногов, Е.В. Сафонов, В.А. Дорохов // Датчики и системы, 2012. – №8(159). – С. 40-43. (ВАК)

6. Krivonogov, A.A. Mathematical Model of Transformation Plane Flow to Spatial One/ A.L. Kartashev, A.A. Krivonogov // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. – Saint Petersburg: IEEE publ. – P. 1–5. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076454/> (SCOPUS)

Авторские свидетельства на программы для ЭВМ:

7. «Вихрь - 2D»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611157 / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов, А.Ю. Ницкий, М.А. Карташева; правообладатель АО «Промышленная группа «Метран». – № 2016660534; заявл. 10.10.2016; опубл. 23.01.2017.

8. «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь - 2D»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616740 / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов, А.Ю. Ницкий, М.А. Карташева; правообладатель АО «Промышленная группа «Метран». – № 2017613825; заявл. 26.04.2017; опубл. 13.06.2017.

Публикации в других изданиях

9. Кривоногов, А.А. Определение функциональных зависимостей между плоским и пространственным течением, для математической модели трансформации / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов, М.А. Карташева// Параллельные вычислительные технологии – XI, (ПАВТ'2017): Сборник коротких статей и описаний плакатов международной научной конференции ПАВТ'2017. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017.– С. 518.

10. Кривоногов, А.А. Математическая модель трансформации плоского вихревого течения в пространственное/А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов// Забавинские научные чтения: сборник материалов XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2017. – С. 317-318.

11. Кривоногов, А.А. Математическая модель трансформации плоского вихревого течения в пространственное/А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов// Забавинские научные чтения: сборник трудов XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2017. – С. 1-15. – URL: http://www.vniitf.ru/images/zst/2017/web/6/11_krivanogov_ru.pdf

12. Кривоногов, А.А. Исследование пространственных гидродинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера и оценка возможности их численного моделирования [Электронный ресурс] / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов // Наука ЮУрГУ. Секция технических наук. Материалы 66-й научной конференции, 2014.– С.33-40. – URL: <http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/4287/3.pdf>

*Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов,
изложенных в диссертации*

Диссертант лично и самостоятельно разрабатывал систему компьютерного моделирования, теоретические положения, методы, алгоритмы и программное обеспечение, выносимые на защиту. Кривоноговым А.А. проведен анализ степени разработанности проблемы, разработаны численные методы и алгоритмы, создан программный комплекс «Вихрь – 2D», выполнена верификация предложенной системы компьютерного моделирования, разработаны рекомендации по применению, апробированы научные результаты, подготовлены публикации по теме исследования, оформлен текст диссертации и выполнено внедрение разработанной системы компьютерного моделирования в промышленное предприятие АО «ПГ «Метран». Из опубликованных работ, написанных в соавторстве в

текст диссертации, вошли те результаты, которые получены ее автором. Результаты, полученные им лично и выносимые на защиту, приведены в следующем разделе.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, поскольку в работе получены оригинальные результаты одновременно в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ, которые обладают теоретической и практической значимостью.

В рамках разработки систем компьютерного и имитационного моделирования (п.8):

1. Система компьютерного моделирования гидродинамического течения с эффектом нестационарного периодического вихреобразования Кармана в стесненном потоке с последующей оптимизацией на основе вычислительного алгоритма трансформации сигнала двумерного течения в параметры трехмерного, позволяющая выполнять моделирование в 40 – 50 раз быстрее, чем метод, основанный на трехмерной математической модели. Система состоит из программных модулей собственной разработки, взаимодействующих с пакетом вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX.

В рамках разработки, обоснования и тестирования эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (п.3):

2. Вычислительный метод трансформации параметров сигнала двумерного течения в характеристики сигнала трехмерного потока.

3. Двухэтапный метод аппроксимации сигнала, сокращающий количество расчетных итераций, необходимых для обработки результатов моделирования.

4. Численный метод оптимизации формы проточного тракта и вихревого течения, основанный на методе Розенброка с дискретным шагом.

В рамках реализации эффективных численных методов и алгоритмов в

виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (п. 4):

5. Комплекс программ для трансформации параметров сигнала двумерного течения в сигнал трехмерного потока, оптимизации формы проточного тракта с вихревым течением Кармана, включающий в себя:

- программный модуль «Вихрь – 2D», для преобразования параметров сигнала двумерного течения в характеристики сигнала трехмерного потока, с использованием двухэтапного метода обработки сигнала для определения амплитуды, частоты и фазы сигнала;
- программный модуль «модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D», для поиска оптимальных геометрических параметров проточной части с вихревым течением, методом Розенброка с дискретным шагом;

Диссертационная работа Кривоногова Алексея Александровича «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала» соответствует требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования. Диссертация является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием, содержит новые научные результаты по математическому моделированию, численным методам и комплексам программ и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение обсуждено и принято на заседании кафедры «Летательные аппараты» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

ПРИСУТСТВОВАЛИ: Терехин А.А., к.т.н., доцент (Председатель заседания); Карташев А.Л., д.т.н., доцент; Королькова Л.И., д.т.н., профессор; Воронин С.Г., д.т.н., профессор; Карташева М.А., к.т.н., доцент; Пешков Р.А., к.т.н., доцент; Мурзин А.М., к.т.н., доцент; Махнович С.В., к.т.н., доцент; Федоров В.Б., к.т.н., доцент; Панфилов А.В., старший преподаватель.

ПРИГЛАШЕНЫ: профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов» ЮУрГУ Кириллов В.В., д.т.н.; зав. кафедрой «Гидравлика и гидропневмосистемы» Спиридонов Е.К., д.т.н., профессор; зав. кафедрой автомобильного транспорта Рождественский Ю.В., д.т.н., профессор; зав. кафедрой «Системы автоматического управления» Ширяев В.И., д.т.н., профессор.

Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол №8 от 20 марта 2018 года.

Терехин Александр Александрович,
кандидат техн. наук,
доцент кафедры «Летательные аппараты»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76,

телефон: +7 (351) 267-94-61

e-mail: terekhinaa@susu.ru

web-сайт: <https://www.susu.ru>

